

# Entwicklung einer Methode zur strahlenharten Positionierung für das primäre Hyperkerntarget an $\overline{\text{PANDA}}$

Diplomarbeit

Falk Schupp  
Helmholtz-Institut Mainz  
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

31.3.2017

Betreut durch Prof. Dr. J. Pochodzalla



# Kurzdarstellung

Beim Hyperkern-Experiment an  $\bar{\text{PANDA}}$  werden langsame  $\Xi^-$  durch Annihilation von Antiprotonen an einem primären Target erzeugt, das aus einem Kohlenstofffilament besteht. Aufgrund der hohen Belastungen des Filaments durch den Strahl, kann das Filament auf Dauer beschädigt werden und ein Austausch im Betrieb notwendig werden. Das Targetsystem des Hyperkern-Experiments muss daher in einem Magazin mehrere Targets vorrätig halten und diese bei Bedarf austauschen können. Für eine Lagerung und Positionierung der primären Targets müssen Bewegungen in zwei Achsen ausgeführt werden, diese werden mittels Piezomotoren realisiert. Bedingt durch die Lage im Vakuum direkt am Wechselwirkungspunkt muss der Aufbau hohen Strahlenbelastungen sowie Magnetfeldern des  $\bar{\text{PANDA}}$ -Detektors standhalten können.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung des primären Targetaufbaus, bestehend aus einem verfahrbaren Tisch, auf dem die Targets lagern, und einer Sensorik zur Positionierung.

Zu Beginn werden kurz die Grundlagen des Experiments vorgestellt. Im Anschluss werden die Anforderungen an den Aufbau vorgestellt und schrittweise der Entwicklungsprozess präsentiert. Dabei wird ausgehend vom vorherigen Design die Weiterentwicklung als CAD-Modell begonnen und die im Anschluss gefertigten Prototypen werden untersucht.

Für die Positionierung der primären Targets wird ein neues Sensorsystem entwickelt, das weder durch Strahlung noch durch Magnetfelder oder Vakuum beeinflusst wird. Zu diesem Zweck werden mechanische Schalter und faseroptische Lichttaster untersucht. Mechanische Taster können im Anschluss daran als Lösung ausgeschlossen werden. Es werden Messungen mit Lichttastern am weiterentwickelten Aufbau durchgeführt, dazu werden verschiedene Geometrien auf einem Reflektor abgetastet. Die Analyse der Messdaten hat eine Ortsauflösung von bis zu  $40\ \mu\text{m}$  für die Positionierung des Tisches ergeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Primärtargetsystem prinzipiell für das Hyperkern-Experiment einsetzbar ist. Die Genauigkeit der Positionierung ist für eine sichere Targetplatzierung bereits jetzt ohne weitere Optimierung ausreichend. Abschließend wird auch die Möglichkeit einer Ortskodierung über die Gestalt der Geometrien verifiziert.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Falk Schupp

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>   | <b>0</b>  |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Das $\overline{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment . . . . .               | 2         |
| 1.2 Der $\overline{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor . . . . .                 | 3         |
| 1.3 Hyperkerne und -atome . . . . .  | 5         |
| 1.3.1 Doppel- $\Lambda$ -Hyperkerne . . . . .                                | 8         |
| 1.3.2 Das Hyperkern-Experiment an $\overline{\text{P}}\text{ANDA}$ . . . . . | 10        |
| 1.3.3 Experimenteller Aufbau des Hyperkern-Experiments . . . . .             | 11        |
| <b>2 Mechanische Aufbau des Primärtargetaufbaus</b>                          | <b>18</b> |
| 2.1 Anforderungen an den Aufbau . . . . .                                    | 18        |
| 2.2 Bisherige Entwicklung . . . . .  | 19        |
| 2.3 Komponenten des weiterentwickelten Aufbaus . . . . .                     | 21        |
| 2.3.1 Der lineare Piezo LEGS <sup>®</sup> Motor . . . . .                    | 21        |
| 2.3.2 Laserbasierter Positionssensor . . . . .                               | 24        |
| 2.3.3 Ersatz für den laserbasierten Positionssensor . . . . .                | 26        |
| 2.3.4 Lagekontrolle für die primären Targets . . . . .                       | 27        |
| 2.4 Entwicklung eines neuen Prototypens . . . . .                            | 28        |
| 2.4.1 Halterung für die Piezomotoren . . . . .                               | 28        |
| 2.4.2 Erster Prototyp für den Piezo LEGS <sup>®</sup> . . . . .              | 29        |
| 2.4.3 Zweiter Prototyp mit Piezo LEGS <sup>®</sup> . . . . .                 | 32        |
| 2.5 Mechanische Umsetzung der CAD-Modelle . . . . .                          | 37        |
| 2.5.1 CAD-Modell des vollständigen Prototypens . . . . .                     | 38        |
| 2.5.2 Polyethylen-Modell aus 3D-Druck . . . . .                              | 39        |
| 2.5.3 Aluminiummodell des Prototypens . . . . .                              | 41        |
| <b>3 Lichtbasierter Positionssensor</b>                                      | <b>44</b> |
| 3.1 Grundprinzip der Positionsbestimmung mittels Lichttaster . . . . .       | 44        |
| 3.1.1 Die optische Logikplatte . . . . .                                     | 45        |
| 3.2 Experimenteller Aufbau . . . . .   | 46        |
| 3.2.1 Verwendete Hardware . . . . .  | 50        |
| 3.3 Vorbereitende Untersuchungen des Messaufbaus . . . . .                   | 54        |
| 3.3.1 Untersuchung der Logikplatte . . . . .                                 | 54        |
| 3.3.2 Kalibrierung des Tastkopfes . . . . .                                  | 57        |
| 3.4 Durchführung der Messungen zur Funktionsüberprüfung . . . . .            | 62        |
| 3.4.1 verschiedenen Tastkopfausrichtungen . . . . .                          | 62        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.4.2    | verschiedenen Geschwindigkeiten . . . . .  | 63         |
| 3.4.3    | alternativer Geometrien . . . . .  | 64         |
| 3.5      | Ortsauflösung des Lichttasters . . . . .   | 65         |
| 3.5.1    | Analyse der aufgenommenen Messdaten mittels Root . . . . .                       | 65         |
| 3.5.2    | Richtungsabhängigkeit der Ergebnisse . . . . .                                   | 68         |
| 3.5.3    | Untersuchung der Richtungsabhängigkeit bezogen auf die Geschwindigkeit . . . . . | 69         |
| 3.5.4    | Analyse der Ortsauflösung . . . . .  | 75         |
| 3.6      | Einfluss der Oberflächengeometrie auf die Signalform . . . . .                   | 77         |
| 3.6.1    | Methodik der Analyse . . . . .   | 77         |
| 3.6.2    | Verschiedene Breiten der Geometrien . . . . .                                    | 81         |
| 3.7      | Geometrien mit verschiedenen Kanten . . . . .                                    | 84         |
| 3.8      | Einfluss des geteilten Tastkopfes auf die Signalform . . . . .                   | 89         |
| 3.8.1    | Auswirkung auf die Amplituden der Minima . . . . .                               | 90         |
| <b>4</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>93</b>  |
|          | <b>Anhang</b>  | <b>94</b>  |
| <b>A</b> | <b>Messdaten und Ergebnisse</b>  | <b>95</b>  |
| A.1      | Messung mit verschiedenen Geschwindigkeiten . . . . .                            | 95         |
| A.2      | Messung mit verschiedenen Tastkopfabständen . . . . .                            | 96         |
| A.3      | Untersuchung der Oberflächengeometrien . . . . .                                 | 97         |
| A.4      | Untersuchung der Ortsauflösung . . . . .   | 98         |
| A.4.1    | Berechnung der Mittelwertsverschiebung in den Positionsverteilungen . . . . .    | 98         |
| A.4.2    | Geschwindigkeitsabhängigkeit der Breite der Positionsverteilungen . . . . .      | 99         |
| A.5      | Untersuchung der Signalzeiten . . . . .  | 100        |
| A.5.1    | Abfallszeiten . . . . .  | 100        |
| A.5.2    | Anstiegszeiten . . . . .   | 101        |
| A.5.3    | Halbwertsbreiten . . . . .   | 102        |
| A.6      | Geschwindigkeitsschwankung nach Motorschaden . . . . .                           | 103        |
| <b>B</b> | <b>Reflexion</b>   | <b>105</b> |
| <b>C</b> | <b>Technische Zeichnungen</b>  | <b>108</b> |
| <b>D</b> | <b>Data Sheets</b>   | <b>110</b> |
| <b>E</b> | <b>Bibliographie</b>   | <b>117</b> |
| <b>F</b> | <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>121</b> |

# Abkürzungsverzeichnis

|                |  |
|----------------|--|
| DCS            | <b>D</b> etector <b>C</b> ontrol <b>S</b> ystem  |
| EMC            | <b>E</b> lectromagnetic <b>C</b> alorimeter  |
| ADC            | <b>A</b> nalog to <b>D</b> igital <b>C</b> onverter  |
| APPA           | <b>A</b> tomic <b>P</b> hysics, <b>P</b> lasma and <b>A</b> ppplied sciences               |
| ASCII          | <b>A</b> merican <b>S</b> tandard <b>C</b> ode for <b>I</b> nformation <b>I</b> nterchange |
| CAD            | <b>C</b> omputer <b>A</b> ssisted <b>D</b> esign   |
| CBM            | <b>C</b> ompressed <b>B</b> aryonic <b>M</b> atter   |
| CR             | <b>C</b> ollector <b>R</b> ing   |
| DIRC           | <b>D</b> etection of <b>I</b> nternally <b>R</b> elected <b>C</b> herenkov light           |
| EPICS          | <b>E</b> xperimental <b>P</b> hysics and <b>I</b> ndustrial <b>C</b> ontrol <b>S</b> ystem |
| FAIR           | <b>F</b> acility for <b>A</b> ntiproton and <b>I</b> on <b>R</b> esearch                   |
| GPIO           | <b>G</b> eneral- <b>P</b> urpose <b>I</b> nput/ <b>O</b> utput                             |
| GSI            | GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung  |
| GUI            | <b>G</b> raphical <b>U</b> ser <b>I</b> nterface   |
| HESR           | <b>H</b> igh <b>E</b> nergy <b>S</b> torage <b>R</b> ing                                   |
| MSV            | <b>M</b> odularised <b>S</b> tart <b>V</b> ersion  |
| MVD            | <b>M</b> icro <b>V</b> ertex <b>D</b> etector  |
| NuSTAR         | <b>N</b> uclear <b>S</b> Ttructure, <b>A</b> strophysics and <b>R</b> eactions             |
| $\bar{P}$ ANDA | <b>A</b> ntiproton <b>A</b> nnihilation at <b>D</b> armstadt                               |
| RESR           | <b>R</b> ecycled <b>E</b> xperimental <b>S</b> torage <b>R</b> ing                         |
| SNL            | <b>S</b> tate <b>N</b> otation <b>L</b> anguage  |
| STT            | <b>S</b> traw <b>T</b> ube <b>T</b> racker   |
| TOF            | <b>T</b> ime <b>O</b> f <b>F</b> light   |

# 1 Einleitung

Während die makroskopische Welt im Wesentlichen durch Gravitation und elektromagnetische Wechselwirkung bestimmt wird, sind im mikroskopischen Bereich der Atomkerne die starke und schwache Wechselwirkung die dominierenden Kräfte. Die Nukleonen als Konstituenten der Atomkerne bestehen aus Quarks, welche der Ansatzpunkt dieser Wechselwirkungen sind. Aufgrund der Dimensionen von Nukleonen im Bereich von einem Femtometer werden Teilchenbeschleuniger mit hohen Energien benötigt, um diese kleinen Strukturen auflösen zu können.

Die größte Herausforderung in der Kernphysik dieses Jahrhunderts liegt in der Vereinigung der vier Grundkräfte in ein gemeinsames Modell. Aktuelle Beobachtungen von Gravitationswellen aus dem Zusammenschluss von schwarzen Löchern ermöglichen die Untersuchung des materiefreien Gravitationsfeldes und werden in Zukunft weitere Erkenntnisse über die Struktur der Gravitation liefern [Abb+16]. Ein weiteres interessantes Objekt zum Studium von Gravitation und starker Wechselwirkung sind Neutronensterne. Bedingt durch ihre hohe Masse und Dichte sind hohe Gravitationsfeldstärken in ihrem Inneren vorhanden [Psa08]. Für ihre Formation spielen jedoch alle vier Wechselwirkungen eine Rolle, die bereits gut bekannte elektromagnetische Wechselwirkung jedoch nur eine untergeordnete. Bisherige Modelle stellen den Kern der Neutronensterne als eine gleichförmige Flüssigkeit aus neutronenreicher Materie dar, welche in Gleichgewicht im Bezug auf die schwache Wechselwirkung ist. Es wird jedoch erwartet, dass bedingt durch die hohen Dichten über die schwache Wechselwirkung weitere hadronische Freiheitsgrade zur Verfügung stehen. Dies sollte bei ungefähr doppelter Kerndichte möglich werden und würde den Fermidruck, welcher die Neutronensterne stabil hält, entlasten.

Die aktuellen Beobachtungen von Neutronensternen mit doppelter solarer Masse [Ant+13] [Dem+10] widerlegen jedoch die bisherigen Zustandsgleichungen. Das resultierende Problem wird als „hyperon puzzle“ bezeichnet [Bom16]. Denkbar wäre hier ein unzureichendes Verständnis der Gravitation im Bereich hoher Dichten oder das derzeit geringe Verständnis der zugrundeliegenden Baryon-Baryon Wechselwirkung. Insbesondere die Hyperon-Hyperon Wechselwirkung ist derzeit nur schlecht verstanden und muss weiter untersucht werden.

Eine große Hürde für derartige Untersuchungen ist das Fehlen eines verwendbaren Hyperontargets aufgrund der geringen Lebensdauer der Teilchen im Bereich von  $10^{-10}$  s. Untersuchungen der Wechselwirkung müssen daher an gebundenen Systemen mit Strangeness erfolgen: Hyperatome sowie Hyperkerne. Deren Erzeugung und Untersuchung kann daher einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der zugrundeliegenden starken Wechselwirkung liefern.



Unter anderem zu diesem Zweck wird derzeit an der GSI<sup>1</sup> in Darmstadt ein neues Beschleunigerzentrum errichtet. Die sich im Bau befindliche Anlage FAIR<sup>2</sup> wird in Zukunft eine wichtige Rolle in der kernphysikalischen Forschung einnehmen. Die Anlage soll primäre Protonen- oder Ionenstrahlen sowie sekundäre Antiprotonenstrahlen zur Verfügung stellen. Hierzu sollen die in Darmstadt bereits bestehenden Teilchenbeschleuniger ausgebaut und durch einen neuen Beschleuniger/Speicherring-Komplex ergänzt werden.

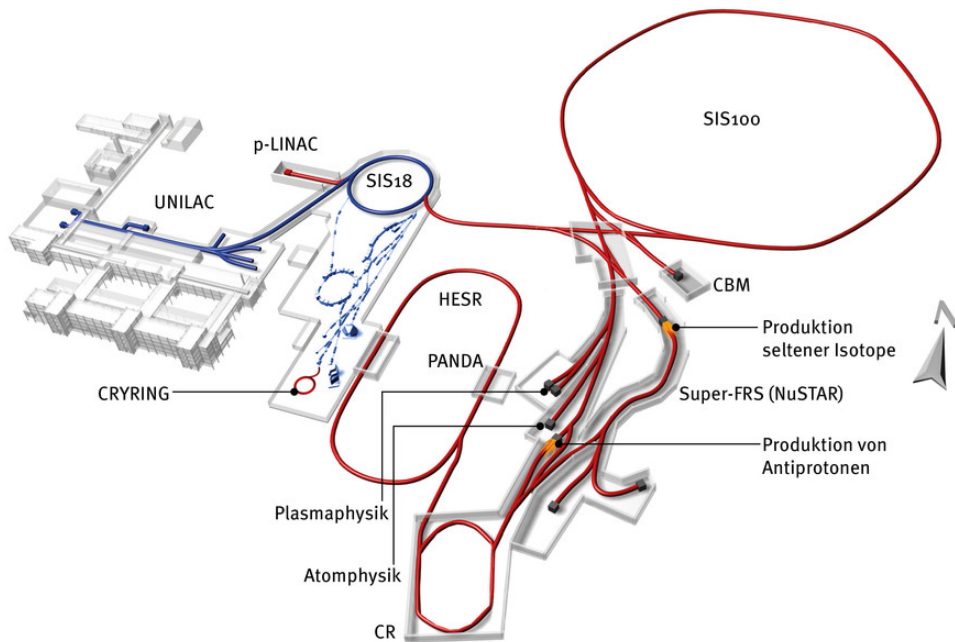


Abb. 1.1: Die FAIR-Einrichtung; In blau die bereits an der GSI bestehenden Einrichtungen, in rot die Erweiterungen. [ion17]

## 1.1 Das $\bar{\text{PANDA}}$ -Experiment

Neben **NuSTAR** zur Erforschung von exotischen Kernen mittels Schwerionenstrahlen [col12], **APPA** für Fragestellungen zur Atom-, Bio- und Plasmaphysik [Stö+15] und **CBM** für die Untersuchung der QCD bei hohen baryonischen Dichten [FST16] ist das  $\bar{\text{PANDA}}$ <sup>3</sup>-Experiment eines der Hauptprojekte an der FAIR-Einrichtung.

Für  $\bar{\text{PANDA}}$  sollen die FAIR-Beschleuniger zur Produktion von Antiprotonen benutzt werden, welche dann in einem Speicherring gesammelt und beschleunigt werden

<sup>1</sup>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung

<sup>2</sup>Facility for Antiproton and Ion Research

<sup>3</sup>Antiproton Annihilation at Darmstadt

können. Auf diese Weise soll ein Antiprotonenstrahl mit einzigartig hoher Luminosität bei gleichzeitig hoher Qualität und Energie entstehen. Durch das hierdurch mögliche Forschungsprogramm wird ein großer Bereich der Hadronenphysik abgedeckt. Im Gegensatz zu den häufig verwendeten  $e^+e^-$ -Collidern werden bei der Annihilation von Antiprotonen viele weitere Reaktionskanäle möglich - jenseits der Quantenzahlen des Photons. Die hohe Strahlintensität wird eine hohe Rate von Strange- und auch Charm-Quarks beinhaltenden Teilchen erzeugen und so die Erforschung ihrer Zerfälle, inneren Struktur sowie der Struktur der zugrundeliegenden Wechselwirkungen ermöglichen. Ein wesentlicher Beitrag im Forschungsprogramm von  $\bar{\text{PANDA}}$  wird die Erforschung der Strangeness sein. Die geplanten Messungen reichen hierbei von der Bestimmung der Potentiale der  $\bar{\Lambda}$  bis hin zur Erzeugung und Spektroskopie von Doppel- $\Lambda$ -Hyperkernen und Hyperatomen im Hyperkernexperiment.

Als Speicherring dient hierzu der HESR<sup>4</sup>. Für die Strahlparameter sind derzeit Impulse von 1,5 GeV/c bis 9,0 GeV/c bei einer Impulsauflösung von  $10^{-5}$  und bis zu  $10^{10}$  simultan gespeicherte Teilchen geplant. Um die hohe Impulsauflösung zu erreichen ist eine stochastische Kühlung sowie eine Elektronenkühlung geplant [Ern+13]. Höhere Strahlströme benötigen einen zusätzlichen, vorgeschalteten Speicherring RESR<sup>5</sup>, der aber nicht in der zunächst realisierten MSV<sup>6</sup> enthalten ist [GG09].

Der Speicherring wird dabei in einem zyklischen Betrieb arbeiten. Im Wechsel werden Messungen durchgeführt oder der Strahl vorbereitet, da Antiprotonen als Sekundärstrahl ihrerseits zuerst erzeugt und im CR<sup>7</sup> gesammelt werden müssen. Danach erst können diese in den HESR eingespeist und auf die geforderten Strahlparameter beschleunigt und gekühlt werden.

$\bar{\text{PANDA}}$  ist als Fixed-Target-Experiment in den HESR integriert. Targets geringer Dichte erlauben Messzeiten in der Größenordnung einer halben Stunde, bevor der Ring wieder aufgefüllt werden muss. Je nach Experiment stehen hierzu Pellet- oder Cluster-Jet-Targets zur Verfügung.

Bei den resultierenden Annihilationen wird eine Vielzahl von schweren Hadronen mit Inhalten bis hin zum Charm-Quark sowie gluonischen Anregungszuständen erzeugt. Deren Zerfallsprodukte mit dem  $\bar{\text{PANDA}}$ -Detektor untersucht und neue Erkenntnisse hinsichtlich der starken Wechselwirkung liefern werden.

## 1.2 Der $\bar{\text{PANDA}}$ -Detektor

Zur Untersuchung der Reaktionen ist ein moderner, vielseitiger, vollelektronischer Detektor in Entwicklung, der möglichst den gesamten Raumwinkel von  $4\pi$  abdecken. Dieser muss neutrale sowie geladene Teilchen in einem weiten Energiebereich von etwa 10 MeV/c bis 10 GeV/c detektieren und dabei mit hoher Auflösung deren Spur, Teilchenart und Energie bestimmen können. Bedingt durch die hohe Luminosität des

<sup>4</sup>High Energy Storage Ring

<sup>5</sup>Recycled Experimental Storage Ring

<sup>6</sup>Modularised Start Version

<sup>7</sup>Collector Ring

HESR muss der Detektor zudem die zu erwartenden hohen Reaktionsraten verarbeiten können.

Der Detektor besteht aus einem Target- und einem Vorwärtsspektrometer. Die einzelnen Detektoren beider Spektrometer sind schichtweise, nach ihrer Funktion sortiert, angeordnet. Das Vorwärtsspektrometer untersucht Teilchen unter kleinen Streuwinkeln (zwischen  $5^\circ$  und  $22^\circ$  vertikal und  $10^\circ$  und  $22^\circ$  horizontal) unter Verwendung eines Dipolfeldes. Das Targetspektrometer dagegen dient zur Detektion von Teilchen unter großen Streuwinkeln (zwischen  $22^\circ$  und  $140^\circ$  zur Strahlachse), ist zylindrisch um die Strahlröhre angeordnet und beinhaltet einen supraleitenden Solenoiden mit 2 T Feldstärke. Zusätzlich existiert eine Endkappe, welche Messungen in rückwärtiger Richtung gestattet (zwischen  $145^\circ$  und  $170^\circ$ ).

Targetspektrometer und Vorwärtsspektrometer erfüllen dieselben Funktionen, bedingt durch den Impuls des Strahls ist jedoch der Großteil der Reaktionsprodukte in Strahlrichtung geboostet, daher muss das Vorwärtsspektrometer entsprechend an die resultierenden, höheren Raten angepasst sein.

Das Targetspektrometer mit seinen einzelnen Detektoren ist um den Wechselwirkungspunkt angeordnet. Ein Überblick zum Aufbau des Detektors ist in Abbildung 1.2 dargestellt. In der ersten Lagen um das Target befindet sich der MVD<sup>8</sup>, welcher auf Siliziumstreifen- bzw. Pixeldetektoren basiert, die zylindrisch um die Strahlröhre bzw. in Strahlrichtung als Scheiben radial um die Strahlröhre [PAN+12] angeordnet sind. Um den MVD befindet sich der STT<sup>9</sup> mit einem Innendurchmesser von 30 cm [Ern+13], dies ist zugleich die maximale Ausdehnung des MVDs. Zusammen sind MVD und STT für das Tracking primärer und sekundärer Zerfallsprodukte zuständig.

Weitere Detektorsysteme beinhalten einen Cherenkov-Detektor (DIRC<sup>10</sup>), den TOF<sup>11</sup> sowie den Myonen-Detektor für die Teilchenidentifikation und das EMC<sup>12</sup> zur Energiemessung.

In Strahlrichtung anschließend an das Vorwärtsspektrometer ist zudem ein Luminositätsdetektor geplant, über den die aktuelle Luminosität bzw. Reaktionsraten gemessen werden können. Dazu wird die Rate an Coulomb-gestreuten Antiprotonen unter einem sehr kleinen Streuwinkel von  $3 - 8$  mrad hinter dem  $\overline{\text{PANDA}}$ -Detektor gemessen.

Ein flexibler Softwaretrigger erlaubt es, die Datenaufnahme an das jeweils laufende Experiment anzupassen und auf einen dedizierten Hardware-Triggerdetektor zu verzichten.

Das Gesamtsystem ist modular geplant, sodass für einzelne Experimente Änderungen vorgenommen werden können, um je nach physikalischen Anforderungen das System optimal anzupassen. So benötigt zum Beispiel das Hyperkernexperiment ein spezielles Targetsystem, sowie hochauflösende  $\gamma$ -Detektoren.

---

<sup>8</sup>Micro Vertex Detector

<sup>9</sup>Straw Tube Tracker

<sup>10</sup>Detection of Internally Reflected Cherenkov light)

<sup>12</sup>Electromagnetic Calorimeter

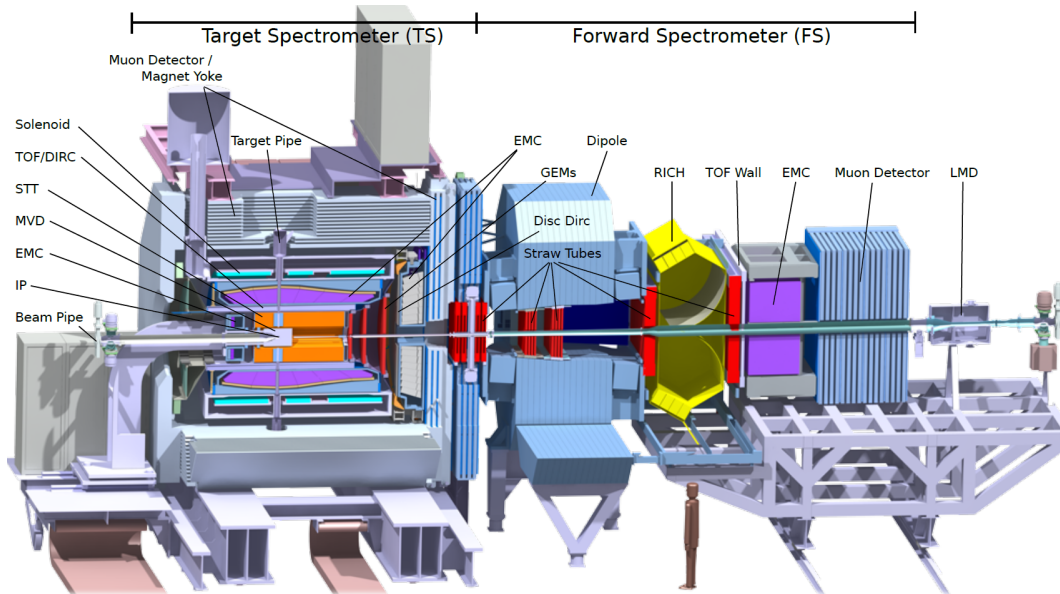


Abb. 1.2: Darstellung des  $\overline{\text{PANDA}}$ -Detektors, Vorwärts- und Targetspektrometer sind mit ihren einzelnen Komponenten gezeigt. Der Aufbau der Komponenten in einzelnen Schichten ist dabei gut zu erkennen. [Ern+17]

### 1.3 Hyperkerne und -atome

Stabile Atomkerne bestehen aus Nukleonen - Protonen und Neutronen, welche durch die starken Kernkräfte gebunden sind. Als Fermionen unterliegen sie dem Pauli-Prinzip, weshalb ihre Bindung in den Kernen eine Schalenstruktur mit den typischen diskreten Bindungsniveaus aufweist. Diese lässt sich in kernphysikalischen Experimenten beobachten und ist eine Möglichkeit zum Studium der Kernkräfte.

Nukleonen gehören zu den Baryonen. Im Speziellen handelt es sich hierbei um die leichtesten Vertreter, welche lediglich aus Up- und Down-Valenzquarks aufgebaut sind. Bei Vorhandensein einer ausreichend großen Energie können jedoch auch schwerere Baryonen beobachtet werden, die durch Einbau eines Strange-Quarks entstehen. Für Baryonen mit Gesamtdrehimpulsquantenzahl  $J = 1/2$  ist das Baryonen-Oktett in Abb. 1.3 dargestellt. Allgemein werden Baryonen mit Strangeness aber ohne schwerere Quarks als Hyperonen bezeichnet.

Eine Möglichkeit zum Studium der Hyperonen sind Hyperatome. Wird ein Hyperon z.B. ein  $\Xi^-$  in Materie abgestoppt, so kann es von einem Atom als einfach negativ geladenes Teilchen eingefangen werden. Analog zu myonischen Atomen, bei denen ein Myon anstelle eines Elektrons eingebaut wird, kann auch ein negatives Hyperon in der Schale eines Atoms eingebaut werden. Im Fall eines Myons wird der mittlere Radius der Schalen aufgrund der, im Vergleich zu einem Elektron, höheren Masse des Myons reduziert, sodass die Orbitale näher an den Kern heranrücken [Poh+13]. Aufgrund

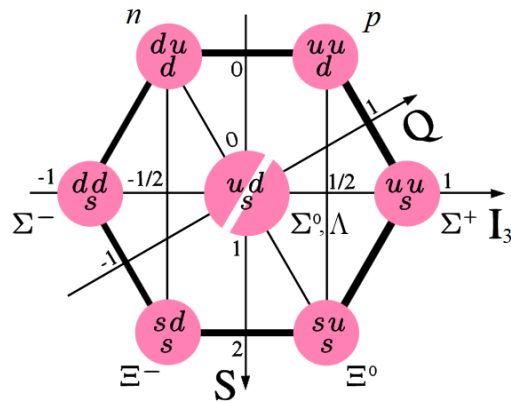


Abb. 1.3: Das Baryonen-Oktett für  $J = 1/2$  [Tra07]

der nochmals größeren Masse der Hyperonen ist dies sogar noch ausgeprägter und die untersten Schalen der Hyperonen befinden sich bereits im Kern [BFG99].

Wird nun ein Hyperon durch ein Atom eingefangen, so kann der Übergang bis in den Grundzustand als eine Kaskade aus Röntgenstrahlung gemessen werden. Da im Gegensatz zu Myonen die Hyperonen der starken Wechselwirkung unterliegen, sind die abgestrahlten Photonen bei Schalen in Kernnähe nicht allein durch die QED zu berechnen. Bei den letzten sichtbaren Übergängen werden die Energieniveaus zusätzlich durch die QCD gestört. Da sich die Effekte der QED exakt berechnen lassen, lassen sich aus der dadurch entstehenden kleinen Energieverschiebung im keV Bereich (bei Eisen z.B.  $\approx 4,4 \text{ keV}$  [Tan+06], für andere Materialien siehe [BFG99]) Rückschlüsse auf das Hyperon-Kernpotential machen.

Eine weitere Möglichkeit, Erkenntnisse über die Struktur der bindenden Kräfte zu erhalten, besteht aus dem Einfang und Bindung von Hyperonen in Atomkernen. Die entstehenden Kerne nennt man Hyperkerne und besitzen den Vorteil, dass das Hyperon zwar ebenfalls ein Fermion ist, jedoch aufgrund des zusätzlichen Flavours neue Energieniveaus zur Verfügung stehen.

Durch den schwachen Zerfall der Hyperonen ist ihre Lebensdauer in der Größenordnung von  $10^{-10} \text{ s}$  und somit ausreichend lang für spektroskopische Untersuchungen. Der Zerfall von Hyperonen, während sie gebunden sind, sowie die Übergänge zwischen den Energieniveaus im Kern bieten einen Zugang zur Erforschung der Kernkräfte, insbesondere der starken Wechselwirkung zwischen Nukleonen und Hyperonen und der allgemeinen Struktur der starken Kernkraft im Atomkern.

Die Produktion von Hyperonen basiert prinzipiell auf der Reaktion

$$aN \rightarrow Yb$$

wobei ein Projektil  $a$  auf ein Nukleon  $N$  trifft und ein Hyperon  $Y$  erzeugt, weitere Teilchen entstehen als Rest  $b$ . Die entstehenden Hyperonen können, im Fall von Hyperkernen, in Kernen gebunden sein oder auch als freie Teilchen wegfliegen. Ihre Nach-

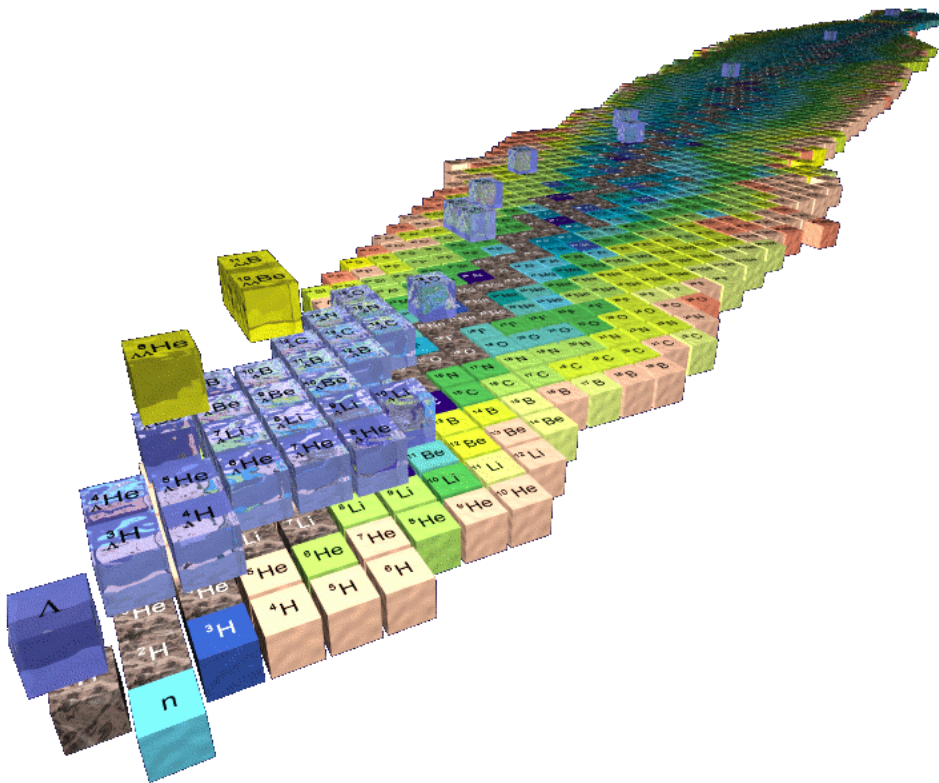


Abb. 1.4: Nuklidkarte der bekannten Isotope erweitert mit der Strangeness als dritte Dimension. In hellblau dargestellt sind bekannte Hyperkerne mit einfacher Strangeness, in belb mit doppelter Strangeness.[Mer06]

weis wird über ihren verzögerten schwachen Zerfall bewerkstelligt, der einen zweiten, verschobenen Vertex erzeugt. Als Observablen lassen sich ihr Zerfall, die Kinematik und die Verzweungsverhältnisse zwischen mesonischen und nicht-mesonischen Zerfällen bestimmen.

Erste Experimente verwendeten hierzu  $K^-$ -Strahlen, die in nuklearen Emulsionen gestoppt werden. Mit der Emulsion lässt sich dann der Zerfall sichtbar machen und durch Untersuchung der Spuren die entsprechende Kinematik bestimmen [DLW80],[HC83],[Coh85] und [BDE81]. Nachteilig an Emulsionsversuchen ist jedoch der große, manuelle Auswertungsaufwand und dadurch bedingt die geringe Statistik. Moderne Experimente konzentrieren sich deshalb auf die Nutzung von elektronischen Detektoren, so z.B. auch das  $\bar{P}$ ANDA Hyperkern-Experiment.

Eine Einordnung der experimentell gefundenen Hyperkerne ist in Abbildung 1.4 gezeigt.

### 1.3.1 Doppel- $\Lambda$ -Hyperkerne

Bei den bisherigen Experimenten zu Hyperkernen sind auch Ereignisse mit doppelter Strangeness beobachtet worden. Diese sind in Abb. 1.4 in gelb dargestellt. Hierzu liegen derzeit aber nur fünf Ereignisse vor. Insbesondere diese doppelten Hyperkerne sind jedoch von großem Interesse, da hier zusätzlich auch noch die Möglichkeit besteht, die Wechselwirkung zweier gebundener Hyperonen miteinander zu erforschen.

Bereits in früheren Experimenten konnte deren Zerfall nachgewiesen und vollständig identifiziert werden, so z.B. im in Abb. 1.5 dargestellten Nagara-Event. Hier wurde ein  ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$  beobachtet, welches anschließend zerfällt [Tak+01].

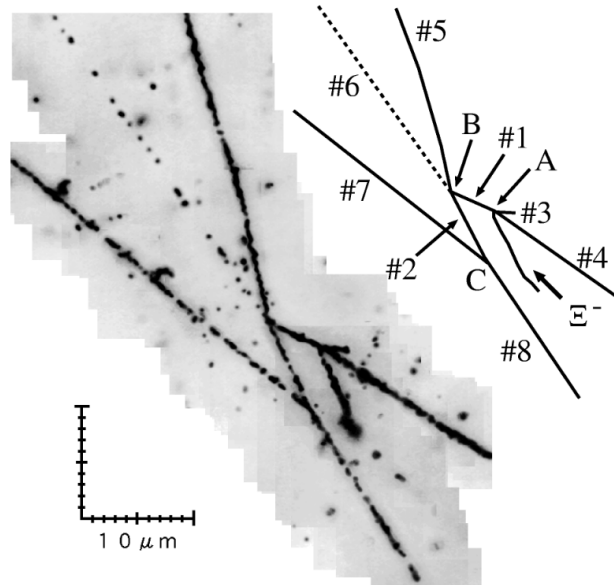


Abb. 1.5: Der erste komplett identifizierte Doppel- $\Lambda$ -Hyperkern, bekannt als Nagara-Event. Am Wechselwirkungspunkt A ist der  ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ -Hyperkern erzeugt worden, mit #1 ist seine beobachtete Spur bezeichnet. Der erste Zerfall, unter Ausstrahlung eines Pions und eines Protons zu  ${}^5_{\Lambda}\text{He}$  ist am Punkt B zu sehen. Am Punkt C wird auch der Zerfall des zweiten  $\Lambda$  sichtbar [Tak+01].

Ein Überblick über die verschiedenen experimentellen Zugänge zur Untersuchung von Doppel- $\Lambda$ -Hyperkernen findet sich in Abb. 1.6. Neben der bereits genannten Methode ist auch die Produktion von Hyperkernen über Schwerionen-Kollisionen möglich, so z.B. im CBM<sup>13</sup>-Experiment, ebenfalls an FAIR. Bei den hochenergetischen Kollisionen und anschließender Fragmentation der Kerne werden auch Hyperkerne produziert [Abe+10], jedoch sind die involvierten Energien derart hoch, dass primär hochangeregte, teilcheninstabile Zustände erreicht werden. Die bereits erwähnte Methode über Kaonenstrahlen dagegen lässt lediglich Untersuchungen an den Grundzuständen zu.

<sup>13</sup>Compressed Baryonic Matter

Die an  $\overline{\text{PANDA}}$  geplante Messung, auf die in Kapitel 1.3.2 weiter eingegangen wird, verwendet dagegen einen zweistufigen Prozess zur Produktion von angeregten Hyperkernen, wodurch diese gemessen werden können.

Anders als die vorangegangenen Experimente wird der Aufbau an FAIR/HESR mit seinen hohen Intensitäten an Antiprotonen einzigartige Voraussetzungen zur Untersuchung von Doppel- $\Lambda$ -Hyperkernen bei hohen Raten ermöglichen und so eine wesentliche Verbesserung der Statistik bewirken. Zudem können an  $\overline{\text{PANDA}}$  neue Hyperkerne entdeckt werden.

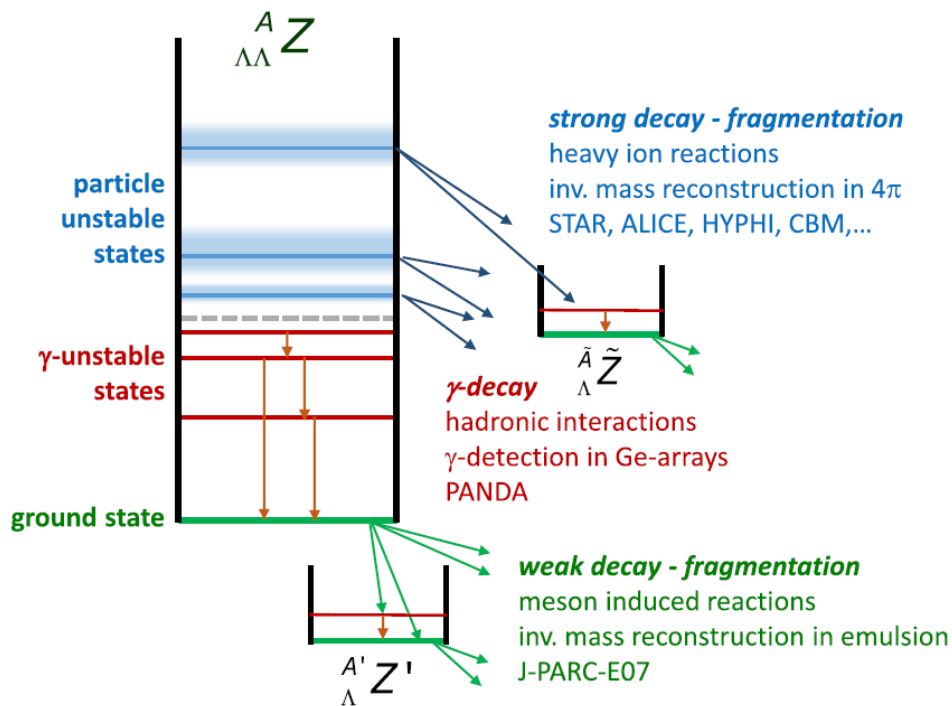


Abb. 1.6: Skizziertem Termschema eines Doppel- $\Lambda$ -Hyperkerns mit Darstellung der verschiedenen experimentellen Zugänge. In grün das Studium der Grundzustände durch Meson-induzierte Reaktionen (z.B.  $K^-$  an J-PARC-E07 [Nak10]), in rot der angeregten Zustände durch Einfang langsamer Hyperonen und deren Abregung in  $\gamma$ -Kaskaden in den Grundzustand ( $\overline{\text{PANDA}}$ ) und in blau der Zustände, die unter Emission von Teilchen zerfallen (Schwerionenreaktionen z.B. CBM) [Sin+16]



### 1.3.2 Das Hyperkern-Experiment an $\overline{\text{PANDA}}$

Das Hyperkern-Experiment ist eine der Grundsäulen des  $\overline{\text{PANDA}}$ -Experiments. Hier wird der Antiprotonenstrahl des HESR in einem zweistufigen Prozess verwendet, um Doppel- $\Lambda$ -Hyperkerne zu erzeugen. Der verwendete Prozess ist in Abb. 1.7 skizziert.

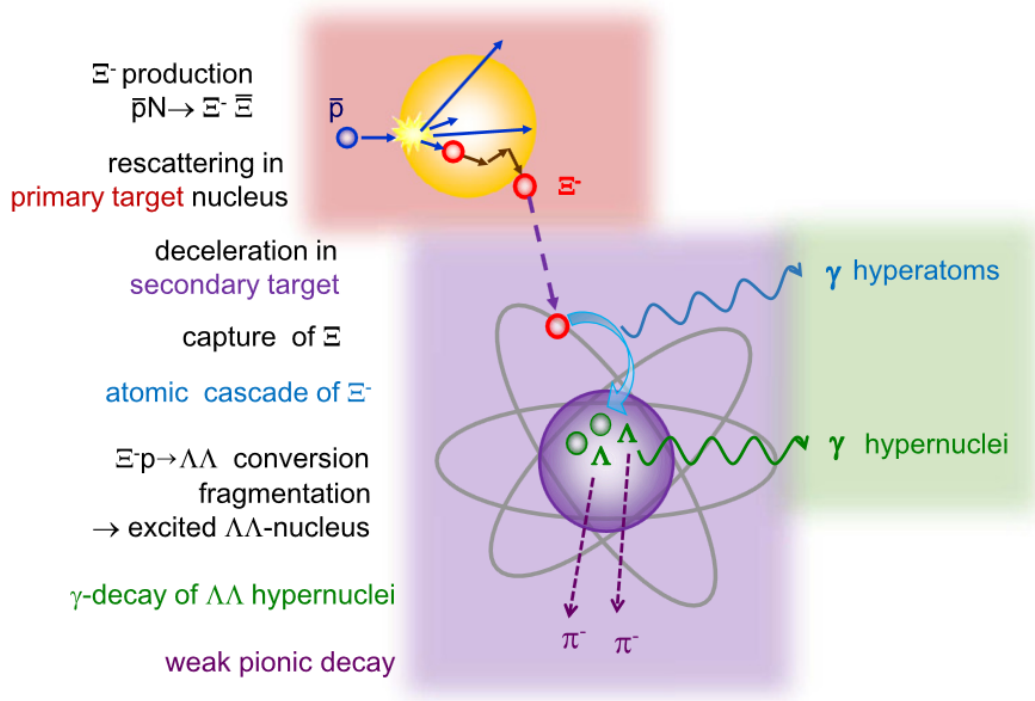


Abb. 1.7: Schematische Darstellung der Erzeugung von Doppel- $\Lambda$ -Hyperkernen an  $\overline{\text{PANDA}}$ . Bei der Reaktion von Antiprotonen an Nukleonen im Primärziel werden  $\Xi^-$  erzeugt. Diese können anschließend in einem sekundären Target eingefangen werden. Dabei entstehen Hyperatome, bei denen das Hyperon, nach Abregung in den Grundzustand, im Kern gebunden wird und zu zwei  $\Lambda$  konvertieren kann. Die freiwerdende Energie kann den Kern fragmentieren und dabei angeregte Doppel- $\Lambda$ -Hyperkerne erzeugen. Deren Abregung unter  $\gamma$ -Ausstrahlung und ihr nachfolgender schwacher Zerfall lassen sich messen [Sin+16].

In einem ersten Schritt werden  $\Xi^-$  durch die Reaktionen

$$\begin{aligned}\bar{p} + p &\rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+ \\ \bar{p} + n &\rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^0\end{aligned}$$

produziert. Bedingt durch die Kinematik an  $\overline{\text{PANDA}}$  können so  $\Xi^-$  mit Impulsen kleiner als  $500 \text{ MeV}/c$  erzeugt werden, welche anschließend in einem Absorber gestoppt werden können. Die durch Einfang der negativen Hyperonen entstehenden

Hyperatome gehen unter Abstrahlung von Röntgenstrahlung in den Grundzustand über. Dabei dringt das  $\Xi^-$  in den Kern ein und wird durch die attraktive starke Wechselwirkung gebunden.

Mit einer geschätzten Wahrscheinlichkeit von 5% [San10] kann das  $\Xi^-$  im Kern durch die Reaktion



umgewandelt werden. Dabei entsteht ein Compound-Kern, der sich durch Fragmentierung oder Neutronen-Abdampfung abregt, wobei auch Fragmente bzw. Kerne mit beiden  $\Lambda$  entstehen können. Auf diese Weise werden Doppel- $\Lambda$ -Hyperkerne unterschiedlicher Isotope produziert, die anschließend unter Aussendung von  $\gamma$ -Strahlung in ihre Grundzustände übergehen. Die Analyse der  $\gamma$ -Energien ermöglicht dann einen Einblick in die Kernpotentiale der Hyperonen bzw. die Wechselwirkung zweier Hyperonen miteinander.

Eine weitere Signalquelle im Verlauf einer Messung ist der Zerfall der gebundenen  $\Lambda$ -Hyperonen im Kern. Diese zerfallen als freie Teilchen fast ausschließlich über die mesonischen Zerfälle  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  (63,9%) und  $\Lambda \rightarrow n\pi^0$  (35,8%) [Pat+16]. Diese Zerfälle sind jedoch bei im Kern gebundenen  $\Lambda$ s unterdrückt, da die freiwerdende Energie nicht ausreicht, freie Energieniveaus zu erreichen. Insbesondere bei schweren Kernen mit einer hohen Fermienergie wird dieser Zerfall daher stark unterdrückt. Bei dem  $\Lambda$ -Zerfall in leichte Hyperkernen ist dennoch weiterhin mit einer hohen Wahrscheinlichkeit für mesonische Zerfälle zu rechnen. Über die Energien der Pionen (beide unterschiedlich, aber monoenergetisch, da Zwei-Körper-Zerfall) kann auf die Bindungsenergie der  $\Lambda$ s geschlossen werden.

### 1.3.3 Experimenteller Aufbau des Hyperkern-Experiments

Zur Erzeugung von Doppel- $\Lambda$ -Hyperkernen ist ein primäres Target zur Erzeugung langsamer  $\Xi^-$  notwendig sowie ein sekundäres Target, worin die  $\Xi^-$  stoppen. Hierzu ist die Standardkonfiguration von  $\bar{\text{PANDA}}$  nicht geeignet. Das Targetsystem muss umgebaut und dedizierte Detektoren verwendet werden. Dazu wird der MVD, das Gas-Target sowie die Endkappe von  $\bar{\text{PANDA}}$  entfernt. Der für das Targetsystem des Hyperkern-Experiments zur Verfügung stehende Platz ist folglich durch den Außendurchmesser des MVD bzw. des Innendurchmessers des STT beschränkt und beträgt maximal 30 cm [PAN+12]. Ohne das Gas-Target ist auch die Strahlröhre in ihrer Form (diese ist geplant für die notwendige Pumpleistung bei einem Gas-Jet-Target) nicht notwendig und kann entsprechend für die neuen Komponenten angepasst werden. In Abbildung 1.8 ist der Aufbau des Hyperkern-Experiments innerhalb des  $\bar{\text{PANDA}}$ -Detektors zu sehen.

Unter Rückwärtswinkeln sind die Germanium-Detektoren zur Messung von  $\gamma$ - und Röntgenstrahlung untergebracht. Bedingt durch die Kinematik der Antiprotonen wird der Großteil der Reaktionsprodukte in Strahlrichtung geboostet sein. Die Platzierung der Germanium-Detektoren entgegen der Strahlrichtung reduziert folglich den Hintergrund, zudem steht durch die Entfernung der Endkappe ausreichend Platz für die Montage zur Verfügung [Ste17].

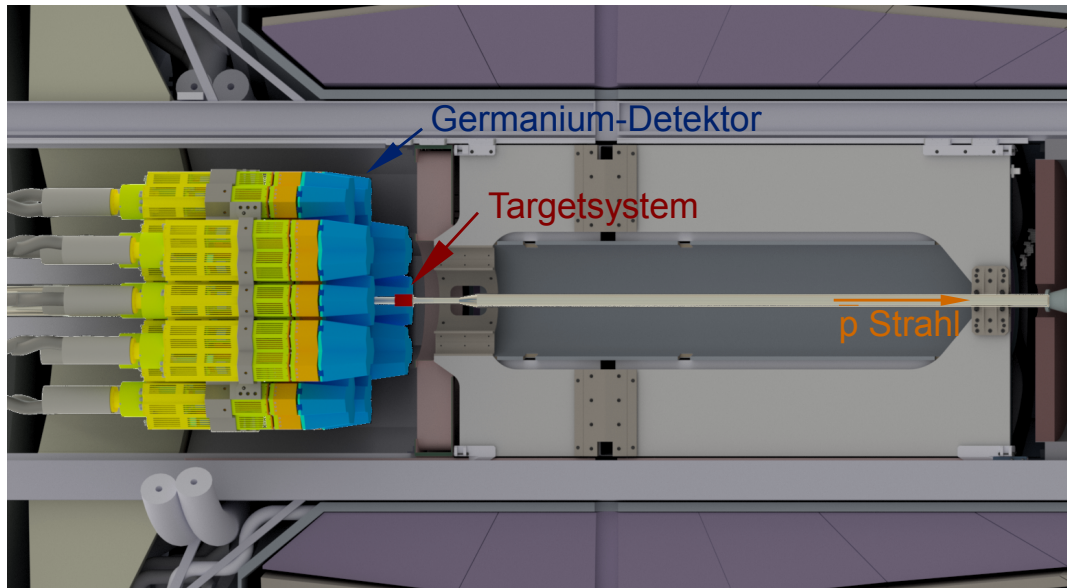


Abb. 1.8: Aufbau des Hyperkern-Experiments im  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor. Zu sehen ist der Hohlraum des MVD, auf der linken Seite die Germanium-Detektoren, in rot primäres und sekundäres Target. [Ste17]

Die Strahlröhre des HESR führt mittig durch die Germanium-Detektoren zum Targetaufbau (aus primärem und sekundärem Target), der seinerseits mit Lagen von Silizium-Streifendetektoren für ein Tracking und eine Energiemessung der Pionen ausgerüstet ist.

### Das Primärtarget

Zur Auswahl eines geeigneten Primärtargets wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Das Primärtarget muss eine ausreichend hohe Reaktionsrate zur Produktion von  $\Xi^-$  liefern, ohne dabei die Strahlqualität des HESR zu stark zu belasten. Aus diesem Grund werden dünne Filament-Targets in der Größenordnung von  $5\ \mu\text{m}$  Durchmesser geplant, die in den Randbereich des Anti-Protonenstrahls gebracht werden, bis die gewünschten Reaktionsraten erreicht sind.

Das Target-Materials muss hohe Erzeugungsraten langsamer  $\Xi^-$  liefern, wenig hadronischen Hintergrund erzeugen und dabei möglichst wenig Antiprotonen durch Coulombstreuung aus dem Strahl entfernen. Aus diesem Grund ist ein Kompromiss zwischen schweren Kernen, die höhere Raten liefern, und leichten Kernen, die den Strahl weniger beeinflussen, zu finden.

Ein weiterer Faktor in den Überlegungen ist die Haltbarkeit der Filamente. Es ist bekannt, dass Targets, die mit hochenergetischen Teilchen bestrahlt werden, einer extremen thermischen Belastung standhalten müssen. Da das Primärtarget am Wechselwirkungspunkt im Innersten des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektors während Messungen nicht er-

reichbar ist, käme die Zerstörung des Targets einem Abbruch der Messung gleich. Die Messungen des Hyperkern-Experiments sind auf etwa drei Monate Messzeit ausgelegt, ein Ausbau des Primärtargets würde voraussichtlich 6-8 Wochen benötigen.

Nach Berücksichtigung der oben genannten Faktoren fiel die Wahl auf Kohlenstoff als Target-Material, entweder als CVD-Diamant oder in Form spezieller Graphitfilamente. Ein großer Vorteil von Kohlenstoff als Target ist seine hohe Wärmeleitfähigkeit, siehe dazu auch Abb. 1.9.

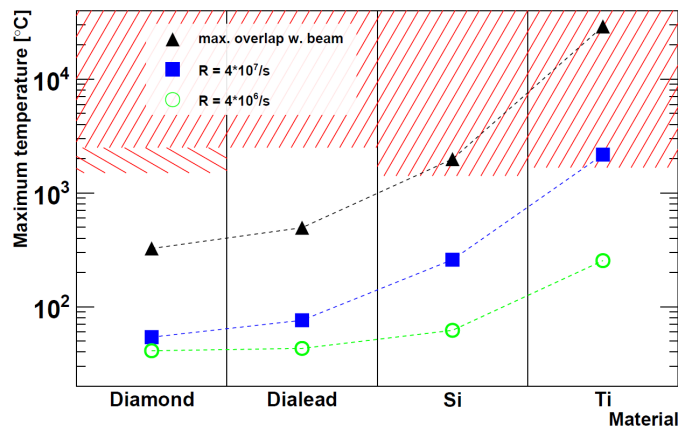


Abb. 1.9: In Simulationen ermittelte maximale Temperatur des primären Targets bei verschiedenen Reaktionsraten. In schwarz bei maximal erreichbarer Reaktionsrate durch vollständiges Überlappen des Targets mit dem Strahlmittelpunkt. Die roten Bereiche markieren die Zerstörungstemperaturen des jeweiligen Targets (z.B. durch Schmelzen). Bei DIALEAD handelt es sich um eine thermisch hoch leitende Karbon-Faser. [Ste17]

Während Silizium und Titan als Target potentiell durch vollständige Bestrahlung schmelzen könnten, sollte Kohlenstoff den thermischen Belastungen standhalten [Ste17].

Als Teil der Überlegungen zum Primärtarget wurde entschieden, dass es notwendig ist mehrere Targets im Aufbau vorrätig zu halten. Diese sollten während der Messung ferngesteuert ausgewechselt werden können, damit, falls ein Target beschädigt wird (z.B. bereits beim Einbau oder später im Strahl), die Messung nur für den wenige Minuten dauernden Tauschprozess unterbrochen werden muss. Zusätzlich würde in Zukunft auch die Möglichkeit bestehen, während einer Strahlzeit verschiedene Targetmaterialien zu verwenden.

### Steuerung der Primärtargetposition

Wie bereits eingangs zum HESR erwähnt hat dieser einen zyklischen Betrieb. Antiprotonen, die während Messungen aus dem Strahl verloren gehen, können erst in einem neuen Zyklus wieder ersetzt werden. Daher ist die Intensität des Antiproto-

nenstrahls und somit die Luminosität eines Experiments im Verlauf einer Messung nicht konstant. Der erwartete Verlauf der Luminosität eines Messzyklus ist in Abb. 1.10 dargestellt.

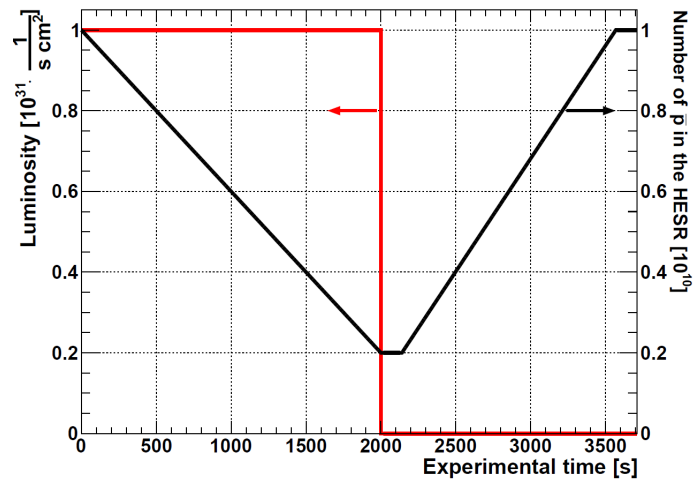


Abb. 1.10: In schwarz dargestellt ist die Anzahl von Antiprotonen, in rot die Luminosität des HESR. Durch Nachregeln der Targetposition ist es möglich eine konstante Luminosität während der Messung zu erreichen. Der „Recycle Mode“ erlaubt es, verbleibende Antiprotonen für den nächsten Messzyklus zu erhalten und dadurch die Füllzeiten zu verkürzen. [Sin+16]

Als Reaktionsrate für das Hyperkern-Experiment wird derzeit eine Rate von  $2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$  geplant. Dabei wird das Primärtarget im Experiment nur in den Randbereich des Strahls gebracht. Durch eine Lageveränderung des Targets relativ zum Strahlmittelpunkt kann die Reaktionsrate erhöht werden. Unter der Annahme einer gaußförmigen bzw. einer parabelförmigen Strahlverteilung ist in Abb. 1.11 der Abstand des Primärtargets vom Strahlmittelpunkt gegen die Messdauer dargestellt, der notwendig ist, um die Reaktionsrate konstant zu halten.

Es ist somit in den ersten 2000 s der Messung nur eine Verlagerung des Targets um  $\text{max. } \approx 0,6 \text{ mm}$  notwendig. Zudem ist der Verlauf ausreichend flach, dass minimale Lagefehler zu keiner größeren Schwankung der Luminosität führen.

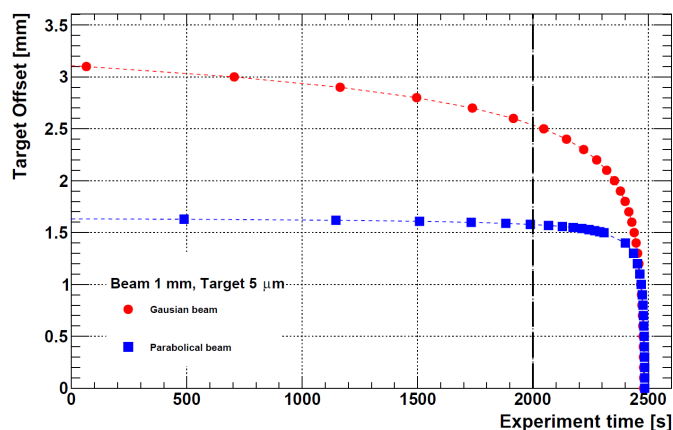


Abb. 1.11: Abstand des Primärtargets vom Strahlmittelpunkt bei verschiedenen Strahlprofilen zur Einhaltung einer konstanten Reaktionsrate bei zeitlicher Reduktion der Strahlintensität. [Ste17]

Um eine Steuerung der Luminosität zu ermöglichen, sollte der Abstand des Primärtargets relativ zur Strahlachse automatisch geregelt sein. Im finalen Experiment wird die Positionierung des Targets durch eine direkte Kopplung mit dem Messsignal des Luminositätsdetektors erreicht. Zusätzlich zur Regelung der Targetposition ist die komplette Entfernung des Targets aus dem Strahl während dessen Vorbereitungszeiten erforderlich. Weitere Details zur Steuerung finden sich unter [Boe17].

### Das sekundäre Target

Das sekundäre Target hat als Aufgabe das Abstoppen und Einfangen der erzeugten  $\Xi^-$  und deren Konvertierung zu Doppel- $\Lambda$ -Hyperkernen. Dazu wird es aus einem geeigneten Absorbermaterial gefertigt, je nach Fokus der Messungen auf Hyperatome oder Hyperkerne sind hier verschiedene Materialien geeignet. Für Hyperatome wird das sekundäre Target aus Eisen gefertigt, da dieses leicht zu fertigen ist und voraussichtlich gut detektierbare Energieverschiebungen der untersten Schalen aufweisen wird.

Für die Erzeugung von Doppel- $\Lambda$ -Hyperkernen sind dagegen leichte Kerne von Interesse, daher wird hier auf Beryllium, Bor oder Kohlenstoff zurückgegriffen. Da zudem die Energieverteilung und Spuren der Pionen als Zerfallsprodukte der Hyperkerne detektiert werden müssen, sind des Weiteren Detektoren im Bereich des Absorbers notwendig. Dazu wird eine Sandwich-Struktur aus Absorbern und Silizium-Streifendetektoren gewählt. Eine schematische Darstellung des Aufbaus ist in Abbildung 1.12 zu sehen.

Gemein haben beide Anwendungen, dass aufgrund der geringen Lebensdauer der erzeugten langsamen  $\Xi^-$ , insbesondere unter Berücksichtigung ihrer relativ geringen Geschwindigkeiten ( $< 500 \text{ MeV}/c$ ), die Reichweite der Teilchen nur sehr gering ist. Daher ist es notwendig, das sekundäre und primäre Target so nahe wie möglich zu

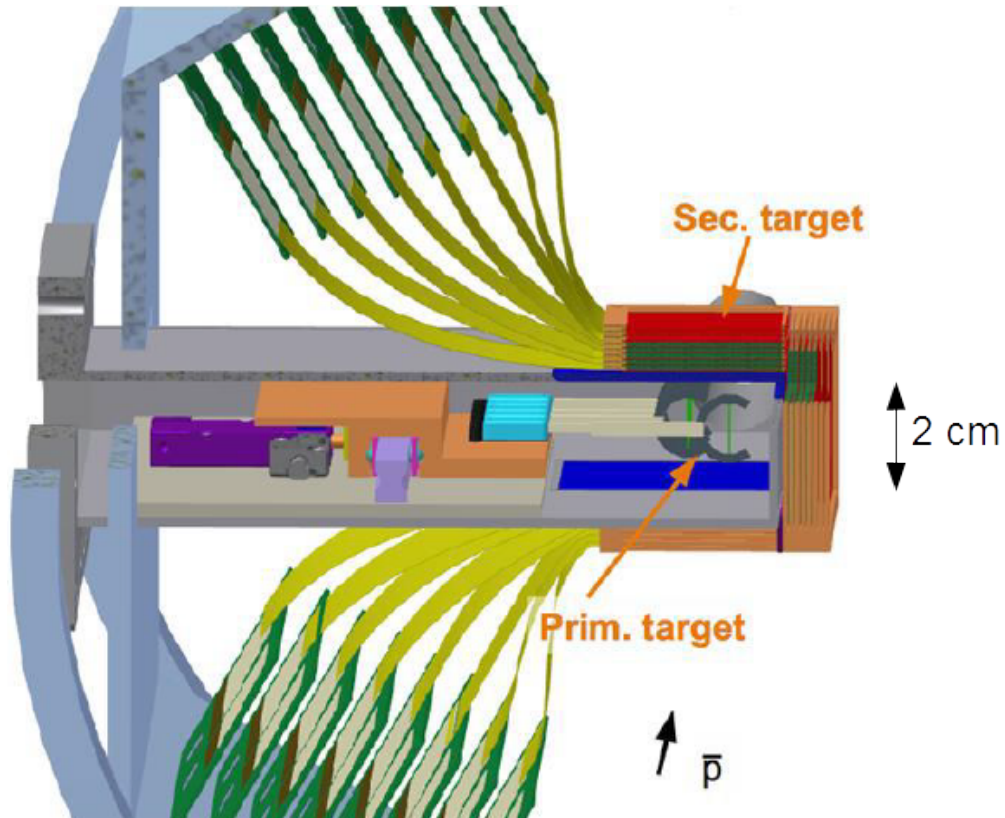


Abb. 1.12: Eine Sandwichstruktur aus Absorbern und Silizium-Streifendetektoren um das primäre Target bildet das Sekundärtarget. Die Elektronik wird aufgefächert um den Aufbau platziert und mit speziellen Aluminium-Polyimid-Flachkabeln verbunden. [Roj16]

platzieren. Zur Strahlfokussierung des HESR ist ein Mindestdurchmesser der Strahlröhre von 2,0 cm notwendig, das Sekundärtarget sollte daher idealerweise als Teil der Strahlröhre ausgelegt sein, um einen kleinstmöglichen Abstand zu erreichen.

Insgesamt sollen pro Block jeweils acht Lagen aus Streifendetektoren und sechs aus Absorber (fünf planare Lagen sowie der Absorber als Strahlröhre) verwendet werden.

Eine Seite des Aufbaus wird für die Unterbringung der Primärtargets sowie ihrer Mechanik benötigt und bietet daher keinen Platz für Detektoren- und Absorberlagen. Ansonsten kann jedoch die gesamte Strahlröhre im Bereich der Vakuumkammer aus Absorbermaterial ausgeführt werden. Position und Form des sekundären Targets wurden in Simulationen auf ihr Abstopverhalten von  $\Xi^-$  hin optimiert [Ble17][Ste17].

Die Ausleseelektronik der Silizium-Streifendetektoren wird aus Platzgründen um den Aufbau aufgefächert. Dabei wird der maximal mögliche Abstand gewählt, um die Absorption der zu messenden  $\gamma$ -Photonen zu reduzieren. Zudem werden spezielle Aluminium-Polyimid-Flachkabel verwendet, um Sensoren und Elektronik zu verbinden.

Die folgende Arbeit wird sich im Wesentlichen auf die Weiterentwicklung des primären Targets beschränken, weiterführende Informationen zur Entwicklung des sekundären Targets finden sich in der Doktorarbeit von Sebastian Bleser [Ble17].

### Germanium Detektoren

Zur Detektion der im Experiment entstehenden  $\gamma$ -Strahlung werden hochauflösende Germanium- $\gamma$ -Detektoren verwendet. Da der Platz für eine Flüssigstickstoff-Kühlung nicht ausreicht, wird eine elektro-mechanische Kühlung genutzt. Insgesamt werden 20 Cluster mit jeweils drei Kristallen verbaut, die einen Polarwinkel von  $100^\circ$  bis  $160^\circ$  abdecken. Die gesamte Elektronik der Detektoren, wie Hochspannungsversorgung, Vorverstärker oder DCS<sup>14</sup> ist bereits in den Detektormodulen verbaut, sodass es sich um ein hochintegriertes System handelt. In Abb. 1.13 ist ein komplettes Modul dargestellt.

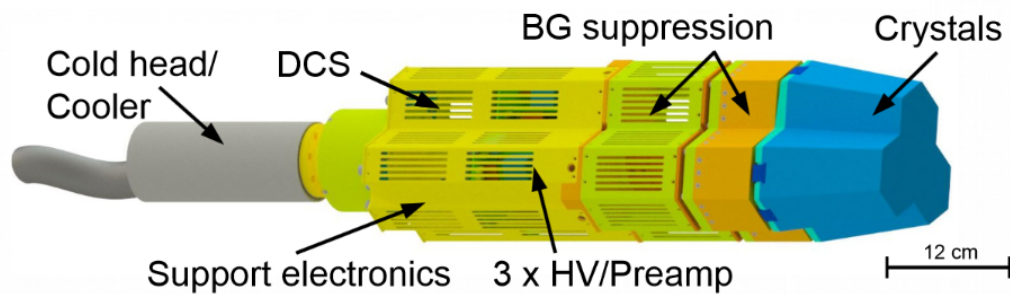


Abb. 1.13: Ein Detektormodul des Germanium-Detektors. Dieser besteht aus drei hochreinen Germaniumkristallen inklusive elektro-mechanischer Kühlung und der vollständigen zum Betrieb notwendigen Elektronik. [Ste17]

Weitere Details zu den Germanium-Detektoren finden sich in der Doktorarbeit von Marcell Steinen [Ste17].

<sup>14</sup>Detector Control System



## 2 Mechanische Aufbau des Primärtargetaufbaus

Das Targetsystem des Hyperkern-Experiments soll mehrere Primärtargets für Messungen vorrätig halten. Diese müssen, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, für eine konstante Reaktionsrate senkrecht zur Strahlachse steuerbar sein, für die Vorbereitungszeiten des Strahls vollständig aus dem Bereich der Strahlröhre entfernt oder für einen Targetwechsel komplett ausgetauscht werden können. Die Komponenten, die dafür benötigt werden, dies ferngesteuert durchzuführen, werden in den folgenden Abschnitten präsentiert.

### 2.1 Anforderungen an den Aufbau

Das Primärtargetsystem des  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$  Hyperkern-Experiments muss (inklusive Vakuumkammer) in den Innendurchmesser des STTs passen. Derselbe Bereich wird bei der normalen  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Konfiguration für den MVD verwendet, daher sind die Dimensionen des STT (als Umgebung des MVD) entscheidend für die maximalen, radialen Ausdehnungen des Gesamtaufbaus. Hieraus folgt, nach den derzeitigen Angaben des MVD [PAN+12], eine maximale radiale Ausdehnung von 15 cm für das Targetsystems des Hyperkern-Experiments.

Entlang der Strahlachse ist die Ausdehnung weniger kritisch und wird zum derzeitigen Stand nicht weiter berücksichtigt. Im Verlauf der weiteren Optimierung sind hier möglicherweise weitere Einschränkungen erforderlich z.B. um eine zu große Massenbelegung zwischen Target und Germanium-Detektoren zu vermeiden. Dies würde zu einer erhöhten  $\gamma$ -Absorption führen und damit die Effizienz der Germanium-Detektoren verschlechtern.

Da sich der gesamte mechanische Aufbau des primären Targets in unmittelbarer Nähe zum Strahlverlauf befindet, ist eine hohe Strahlenhärte der verwendeten Hardware erforderlich. Desweiteren befindet sich der Aufbau innerhalb des Vakuums für den Strahl des HESR und muss somit, bei bis zu  $10^{-9}$  mBar, sicher und dauerhaft funktionieren, ohne dabei das Vakuum wesentlich zu verschlechtern.

Dies stellt bereits hohe Anforderungen an die verwendbare Hardware, da hierzu nur Komponenten für Ultrahochvakuum-Anwendungen in Frage kommen. Gleichzeitig sollte allerdings bedacht werden, dass bei  $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$  im normalen Betrieb ein Gas-Target verwendet wird, welches lokal das Vakuum weit stärker belastet. Daher sollte für das Hyperkern-Experiment, eine minimale Ausgasung der Hardware kein Problem darstellen.

Eine weitere Anforderung ergibt sich durch die Lage innerhalb des Solenoid-Magnetfelds von potentiell bis zu 2,0 T. Ein ungestörter Betrieb der verwendeten Hardware muss bei hohen magnetischen Feldstärken garantiert sein.

Die Messanordnung für das Sekundärtarget bedingt zudem weitere Einschränkung an die Dimensionen des Aufbaus. Um ausreichend hohe Raten bei der Produktion von Hyperkernen zu erzielen, ist es aufgrund der kurzlebigen  $\Xi^-$ , unabdingbar Primär- und Sekundärtarget so nah wie möglich aneinander zu plazieren. Gleichzeitig ist aber ein gewisser Minimaldurchmesser der Strahlröhre erforderlich, da der HESR zur Strahlfokussierung einen Mindestradius von 1,0 cm benötigt. Dies bedeutet, dass die Vakuumkammer im Bereich der Strahlröhre nicht mehr als 2,0 cm Ausdehnung haben darf, damit die Sekundärtarget-Lagen möglichst nahe am Primärvertex liegen. Nicht dadurch betroffen ist der weiter vom Strahl entfernten Bereich des Aufbaus, in dem die Höhe weniger kritisch ist, da das Sekundärtarget nur im unmittelbaren Bereich der Strahlröhre liegt.

Für eine weitere Verbesserung der Produktionsraten soll auch die Strahlröhre im Bereich des Primärtargets aus dem Absorbermaterial des sekundären Targets gefertigt werden. Zwangsläufig muss eine Öffnung in der Strahlröhre vorhanden sein, durch die die Primärtargets in den Strahl geführt werden können. Diese ist derzeit mit 2 mm Breite veranschlagt. Des Weiteren handelt es sich bei den Primärtargets um dünne Filamente, die bei mechanischen Belastungen leicht beschädigt werden können. Eine zuverlässige Lösung zur Positionierung der Targets vor der Strahlröhrenöffnung und eine sichere Lagerung der unbenutzten Targets muss daher garantieren sein.

Zusammengefasst setzt dies einen mechanischen Aufbau voraus, der eine Bewegung der primären Targets entlang zweier Achsen ermöglicht: Eine Achse senkrecht zur Strahlachse zum Einführen des Targets in die Strahlröhre bzw. Lageregelung relativ zum Strahlmittelpunkt. Eine weitere zur Bewegung eines Schlittens mit verschiedenen Targets, die durch seitliches Versetzen vor die Öffnung der Strahlröhre gebracht werden können.

## 2.2 Bisherige Entwicklung

Eine erster Prototyp wurde durch Sebastian Bleser und Marta Martínez Rojo entwickelt. Ein CAD-Modell des Aufbaus ist in Abb. 2.1 dargestellt. Die Primärtargets werden durch lineare Piezomotoren (für die allgemeine Funktionsweise von Piezomotoren siehe Kapitel 2.3.1) bewegt und erlauben eine sehr präzise Bewegung der Targets im Bereich von  $1\ \mu\text{m}$ .

Um mehrere Targets gleichzeitig lagern zu können, wurden diese, zusammen mit ihrem Piezomotor als Antrieb, auf einem Tisch, der in Richtung der Strahlachse verschoben werden kann, montiert. Für die Bewegung des Tisches in Strahlrichtung wurde ein spezieller elliptischer Piezomotor (HR1) verwendet, der bereits werksseitig zum Einsatz in Vakuum und Magnetfeldern geeignet ist. Bei diesem Typ Motor wird die Antriebsachse gegen eine Keramikplatte am Tisch gepresst. Der Motor bewegt die Achse in einem elliptischen Muster um die Keramikplatte relativ zum Motor zu

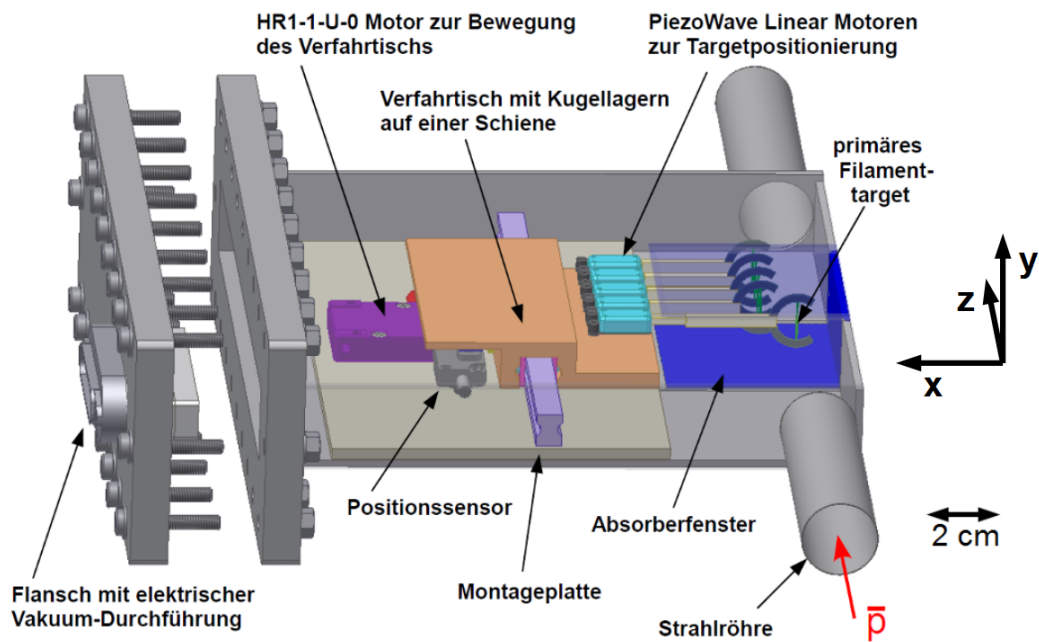


Abb. 2.1: CAD-Modell des ursprünglichen Prototypens inklusive Vakuumkammer. Ein HR1-Piezomotor treibt einen Schlitten entlang der Strahlachse an. Dieser dient als Magazin für mehrere Targets, wobei jedes seinen eigenen Antrieb für das Einfahren in die Strahlröhre besitzt. Das grundlegende Design stammt aus [Ble17], erste Untersuchungen bzgl. der Funktion wurden in [Roj16] durchgeführt.

verschieben. Der Motor ist jedoch in seinen Dimensionen relativ groß und bedingt durch den nötigen Anpressdruck potentiell problematisch bei der Montage.

Die Position des Tisches wurde durch einen optischen Positionssensor gemessen (siehe Abschnitt 2.3.2). Auf diese Weise kann jeweils ein Target vor die Strahlrohröffnung bewegt werden und durch den zugehörigen Piezomotor des Targets in den Strahl eingeführt werden [Ble17].

Für den ersten Prototypen wurden primär kostengünstige Motoren für die Primärtargets beschafft, welche auf ihre Eignung im Vakuum, unter Bestrahlung und auf verschiedene Belastungen hin untersucht wurden. Bei Bestrahlungstests sowie beim Betrieb in Magnetfeldern war keine Verschlechterung der Motorleistung festzustellen. Auch Vakuumtests ergaben keine feststellbare Veränderung. Da die Hüllen dieser Motoren jedoch aus Plastik gefertigt sind, ist langfristig von einem Ausgasen auszugehen. Prinzipiell zeigte sich die Tauglichkeit von Piezomotoren unter den erforderlichen Bedingungen [Roj16].

Die verwendeten Motoren weisen allerdings keinen ausreichend langen Hub für einen Einsatz im Hyperkern-Experiment auf, es wurde daher notwendig neue Moto-

ren zu finden. Ebenfalls fraglich ist die Verwendbarkeit des Positionssensors unter Strahlungsbedingungen. Da der Sensor mikroelektronische Bauteile verwendet, unter anderem eine Laserdiode, ist keine langfristige Anwendung bei Bestrahlung sinnvoll.

### 2.3 Komponenten des weiterentwickelten Aufbaus

Für eine Weiterentwicklung des mechanischen Aufbaus ist es notwendig, neue Motoren zu finden, die einen ausreichend langen Hub zur Verfügung stellen. Hierzu wurde der Piezo LEGS<sup>®</sup> von PiezoMotors gewählt, welcher bis zu 80,0 mm Fahrweg ermöglicht.

Die neuen Motoren sind jedoch in den Dimensionen größer als die zuvor verwendeten. Insbesondere die Höhe ist hier entscheidend, da die neuen Motoren bereits 19,3 mm groß sind und somit nur knapp in den vorhandenen Platz von 20 mm passen. Prinzipiell wäre es möglich die Motoren auf der Seite liegend zu verbauen, was jedoch die Anzahl der Targets reduzieren oder den Aufbau in z-Richtung wesentlich länger machen würde. Für die Umsetzung mit stehenden Motoren muss jedoch das Design aufgrund der Höhe grundlegend überarbeitet werden.

Für den Positionssensor wurde dagegen keine vorgefertigte Lösung gefunden und eine Eigenentwicklung begonnen. Benötigt wird keine Reproduktion des laserbasierten Positionssensors sondern lediglich eine zuverlässige Methode zum Finden der richtigen Einfahrpositionen. Also jenen Positionen, bei denen die Targets vor der Öffnung in der Strahlröhre stehen, sowie eine Rückmeldung, welches Target derzeit vor der Öffnung steht.

Während der Neuentwicklung soll zudem bereits eine Strategie zur mobilen Verlegung der Kabel beachtet werden. Jeder der neuen Motoren hat sechs Kabeladern, somit muss insgesamt von mehr als 30 Kabeln ausgegangen werden, welche vom Schlitten hin- und wegführen und sich bei Bewegungen des Schlittens frei mitbewegen können müssen.

#### 2.3.1 Der lineare Piezo LEGS<sup>®</sup> Motor

Für diese Arbeit wird der Piezo LEGS<sup>®</sup> Linear 6N LL10 Motor der Firma PiezoMotor Uppsala AB aus Schweden verwendet. Dieser Motor ist in einer amagnetischen, vakuumtauglichen Version erhältlich und ist in Abbildung 2.2 dargestellt. In diesem Fall besteht das Motorgehäuse aus Titan und die Verkabelung ist teflonbeschichtet. Keine Informationen liegen zur Strahlenhärte der Motoren vor, hierzu müssen weitere Untersuchungen angestellt werden. Das Datenblatt mit allen Informationen zum Motor findet sich im Anhang D.

Der Motor ist 19,3 mm hoch, 10,8 mm breit, mit einer variablen Länge in Antriebsrichtung - mit Stangen im Bereich von 30 mm bis 100,8 mm Länge.



Abb. 2.2: Linearer Piezomotor Piezo LEGS<sup>®</sup> Linear 6N LL10. [Pie16a]

### Funktionsprinzip

Der verwendete Piezomotor bewegt eine keramische Antriebsstange mittels Reibung durch bewegliche Antriebsbeine. Das Prinzip des Vortriebs ist in Abbildung 2.3 verdeutlicht. Der piezoelektrische Effekt bewirkt die Längenänderung spezieller Kristalle durch Anlegen eines elektrischen Feldes. Dies wird verwendet um die Beine seitlich zu beugen bzw. ihre Länge zu verändern. Das Arbeitsprinzip beinhaltet das Strecken der Beine bis zum festen Kontakt mit der Keramikstange und das anschließende seitliche Abbeugen während der Kontakt besteht, um so die Antriebsstange seitlich zu bewegen. Diese Bewegung wird jeweils von der Hälfte der Beine durchgeführt, während die andere Hälfte im gestauchten Zustand zur Ausgangsposition zurückbewegt wird.

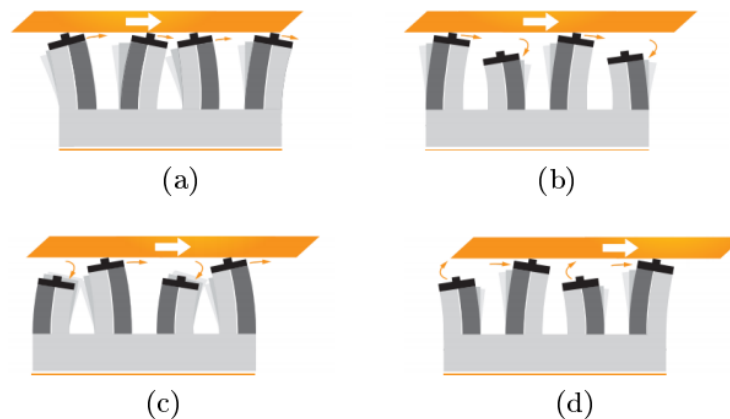


Abb. 2.3: Darstellung des Arbeitsprinzips eines Piezo LEGS<sup>®</sup>. Erklärung der Funktion im Text. [Pie16a]

Typische Schrittweiten für den verwendeten Piezomotor liegen bei  $4\ \mu\text{m}$ . Die Geschwindigkeit wird festgelegt durch die Frequenz der Beinbewegungen und kann bis zu 2500 Schritte pro Sekunde betragen. Hierbei beträgt der Stromverbrauch laut Hersteller  $5\ \text{mW/Hz}$ . Da kein fester Kontakt zwischen Antriebsstange und Motor besteht, kann die Stange bei genügend großer Krafteinwirkung durchrutschen. Die entsprechende maximale Haltekraft beträgt nach Herstellerangaben  $7\ \text{N}$ , der Motor

kann Kräfte von bis zu 6,5 N aufbringen. Umgekehrt ist es aber auch so, dass der Motor gefahrlos in einen Endanschlag fahren kann. In diesem Fall würden die Antriebsbeine wirkungslos an der Keramikstange entlang reiben und der Motor keinen unmittelbaren Schaden nehmen.

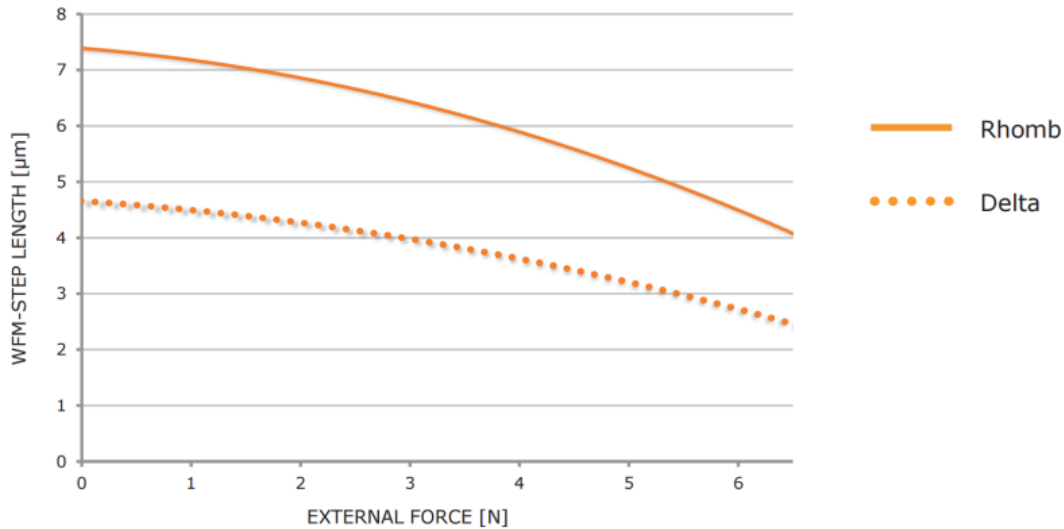


Abb. 2.4: Schrittweite des Piezo LEGS<sup>®</sup> aufgetragen gegen die vom Motor zu überwindende externe Kraft gegen die Bewegungsrichtung, dargestellt für zwei verschiedene, einstellbare Antriebssignale des Motors. Rhomb bzw. Delta unterscheiden sich in Geschwindigkeit und Auflösung. Für diese Arbeit wird der präzisere Modus „Delta“ gewählt. [Pie16a]

Nachteilig an den Piezomotoren ist die fehlende Rückmeldung über die gefahrene Strecke. Die Schrittlänge der Motor ist lastabhängig, seitens des Herstellers gibt es hierzu die in Abb. 2.4 gezeigten Daten. Die verschiedenen Kurven beziehen sich auf verschiedene Signalformen zum Steuern der Beine.

Ein beim Betrieb zu beachtender Punkt ist, dass die Antriebsstange nicht aus dem Motor fahren darf. Ohne die Antriebsstange als Gegenlager können die Beine und somit der Motor beschädigt werden. Idealerweise ist also Sorge zu tragen, dass die mechanischen Eigenschaften des angetriebenen System dies unmöglich machen. Die fehlende Lagekontrolle muss mit einem separaten System bewerkstelligt werden.

## Elektronik

Zur Steuerung der Piezomotoren wird das vom Hersteller angebotene Steuerelement PMD<sup>1</sup>101 (siehe Abb. 2.5) verwendet. Dies ermöglicht über eine USB-Schnittstelle einen einfachen Anschluss an jeden gängigen PC und kann über einen ASCII-Stream

<sup>1</sup>Piezo Microstep Driver



Abb. 2.5: Steuerelektronik des Piezo LEGS<sup>®</sup>, der PMD101 von PiezoMotor. [Pie16b]

gesteuert werden. Durch einen entsprechenden Treiber lässt sich die Steuerung über EPICS<sup>2</sup> kontrollieren. Bei EPICS handelt es sich um eine Steuersoftware/Umgebung [col16], mit der eine einfache Steuerung verschiedener Komponenten über Netzwerk zu realisieren ist. Diese wird bei PANDA als DCS-Software verwendet. Weitere Details zu EPICS und den Treibern finden sich in [Boe17].

### 2.3.2 Laserbasierter Positionssensor

Im ursprünglichen Design wurde zur Positionsbestimmung ein Mercury 1000V-MV von MicroE Systems<sup>®</sup> aus den USA verwendet (siehe Abb. 2.6). Dieser äußerst kompakte Sensor ist bereits werksseitig für bis zu  $10^{-8}$  Torr vakuumgeeignet. Zu seiner Eignung in Magnetfeldern liegen keine Informationen vor.

Der Sensorkopf enthält eine Laserdiode sowie eine Photodiode. Mittels Laser wird ein optisches Gitter in einem Glasmaßstab (siehe Abb. 2.7) bestrahlt und die resultierenden Beugungsminima/-maxima zur relativen Positionsbestimmung verwendet.

Vor einer Anwendung muss der Sensor mittels eines speziellen Kalibrierwerkzeugs, korrekt ausgerichtet werden. Die notwendige Genauigkeit der Justage ist ohne Probleme zu erreichen, eine ungefähr parallele Montage von Maßstab und Positionssensor, bei hinreichend kleinem Abstand zwischen Diode und Maßstab, reicht bereits für „optimale“ Signalpegel (laut beigelegter Software).

---

<sup>2</sup>Experimental Physics and Industrial Control System

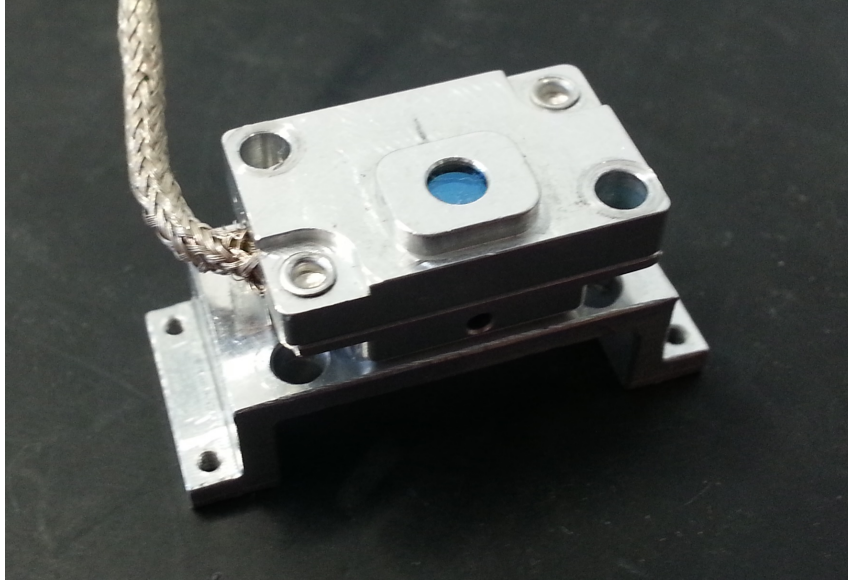


Abb. 2.6: Mercury 1000V-MV der Firma MicroE Systems. Die Maße des Systems betragen 20,57 mm · 12,70 mm · 6,91 mm. Auf dem Bild ist der Sensor auf der verwendeten Halterung montiert.

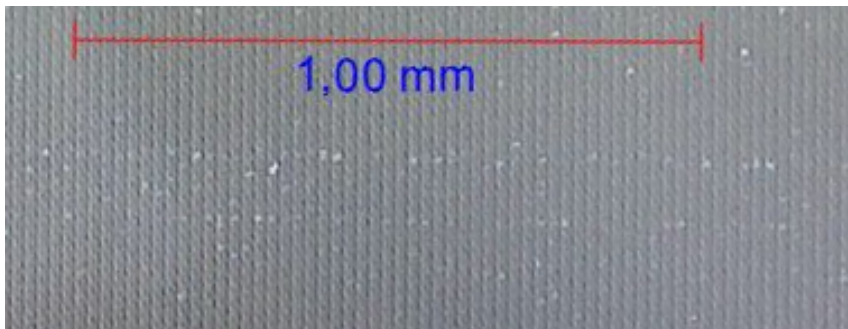


Abb. 2.7: Glasmaßstab des laserbasierten Positionssensors. Gezeigt ist ein Ausschnitt der Oberfläche unter einem Mikroskop vergrößert. Deutlich sichtbar ist das optische Gitter mit einer Gitterkonstante von  $20\ \mu\text{m}$  [Tie17].

Allerdings ist bei der Verwendung des Sensors zu berücksichtigen, dass dieser keine absolute Position bestimmen kann. Beim Ein-/Ausschalten oder durch Softwarebefehl wird die Nullposition festgelegt und lediglich relative Positionen werden angezeigt. Die absoluten Encoderwerte verschiedener Messungen sind somit nicht vergleichbar.

Der Positionssensor selbst liefert lediglich ein analoges Ausgangssignal, dieses wird durch ein Galil DMC 4113 in ein digitales Signal übersetzt. Über einen Laborcomputer mit der EPICS-Umgebung kann dieses ausgewertet werden.



Aufgrund der Verwendung von Dioden im Sensor ist jedoch davon auszugehen, dass dieser nicht strahlenhart ist. Es muss daher eine strahlenharte Alternative entwickelt werden.

Erste Untersuchungen des Sensors haben eine Ortsauflösung von  $5\ \mu\text{m}$  pro „step“ ergeben [Tie17], im weiteren Verlauf wird der Sensor daher als Referenzsystem mit bekannter Genauigkeit verwendet. Auf diese Weise kann die Auflösung des Ersatzsystems direkt getestet werden.

### 2.3.3 Ersatz für den laserbasierten Positionssensor

In einem ersten Schritt wurden alle mögliche Optionen durchgegangen. Benötigt wird ein strahlenhartes, magnetfeldresistentes und vakuumtaugliches System. Der Einsatz aller Formen von Mikroelektronik im Bereich des Primärtargetaufbaus ist, aufgrund der dort während der Messung vorherrschenden Strahlung, prinzipiell fraglich. Es wird daher ein möglichst einfaches System gesucht, das entweder ohne strahlungsempfindliche Elektronik auskommt oder bei dem diese in ausreichend großer Entfernung platziert werden kann.

Hierzu wurde eine Liste von möglichen Kandidaten aufgestellt, die im Folgenden erläutert werden soll:

- Mechanische Taster:  
Einfache mechanische Taster, welche bei Druck auf einen federgelagerten Stift bzw. auf eine Kugel schalten. Kombiniert mit einer entsprechenden Logik an dem beweglichen Aufbau wäre eine Lagebestimmung hierdurch realisierbar. Derartige Schalter für die Verwendung unter Normalbedingungen sind einfach zu erwerben. Ferner gibt es auch die Möglichkeit bei der Firma IRELEC derartige Schalter für Vakuum- und Magnetfeldanwendungen zu beziehen.
- Potentiometer:  
Alternatives mechanisches Prinzip, bei dem ein Potentiometer durch den Tisch verstellt wird und über Widerstandsmessung die Position zu ermitteln ist. Es wurde jedoch kein Hersteller gefunden, welcher diese für Vakuumanwendung vertreibt.
- Induktive Sensoren:  
Sensoren, welche den Abstand von einer Oberfläche mittels Induktivität messen. Üblicherweise realisiert durch eine Spule mit Ferritkern sowie einem Schwingkreis zur Auslese, daher in Magnetfeldern weniger geeignet.
- Kapazitive Sensoren:  
Sensoren, die den Abstand über die Kapazität messen. Fertige Elemente für Vakuumanwendungen sind erhältlich und können Abstände von  $10\ \mu\text{m}$  bis zu  $2\ \text{mm}$  mit hoher Auflösung im  $\text{nm}$ -Bereich messen. Mit einer entsprechend geformten Oberfläche wäre potentiell eine genaue Lagekontrolle möglich.

- **Lichttaster bzw. -schranken:**  
Einfache Lichtschranken, deren Sende- bzw. Empfangskopf auf Mikroelektronik basieren, kommen aufgrund der Strahlung nicht in Betracht. Erhältlich ist jedoch, vertrieben durch die Firma Tippkemper, ein System, welches Photodiode und Lichtemissionsdiode außerhalb des Anwendungsorts aufstellt und zum Einsatzort mittels LWL<sup>3</sup> führt. Hier sind bis zu 15 m Abstand zum Detektor möglich, weshalb Strahlenbelastung kein Problem darstellen dürfte. Nach Rücksprache mit der Firma ist es auch möglich eine spezielle Anfertigung aus vakuumgeeigneten LWL zu erhalten. Das System funktioniert, indem Infrarotlicht mittels eines LWL zum Einsatzort geführt wird, dort durch eine spezielle Optik fokussiert auf eine Oberfläche strahlt und deren Reflektion mittels desselben LWL an die Photodiode zurück geleitet wird. Durch Beeinflussung des Reflexionsverhaltens der Oberfläche lässt sich hiermit ebenfalls eine Logik realisieren.

Unabhängig vom verwendeten System ist es das Ziel eine Präzision von  $< 0,5$  mm, um sicherzustellen, dass der Rahmen des Targetfilament, beim Einfahren in die entsprechende Öffnung, nicht mit der Strahlröhre kollidiert. Aufgrund der filigranen Natur der Filamente würde dies nahezu sicher zur Zerstörung des Targets führen.

Bedingt durch die Schwierigkeiten, für Vakuum geeignete Hardware zu finden, wurde der Potentiometer-Ansatz verworfen. Ebenso wurden, aufgrund von Zweifeln an der Eignung in starken Magnetfeldern, die induktiven Sensoren nicht weiter verfolgt.

Als potentiell umsetzbare Systeme bleiben somit kapazitive Sensoren, mechanische Taster und Lichttaster. Die Entscheidung fiel hier vorerst auf mechanische Taster aufgrund der einfachen Beschaffung sowie LWL-Taster. Insbesondere das zweite Prinzip ist sehr vielversprechend: Die Lichtwellenleiter sind relativ klein und daher auch vom Platzbedarf problemlos integrierbar. Zudem beeinflusst ein Lichtwellenleiter weder magnetische noch elektrische Felder. Bei kapazitiven Sensoren wäre ein Einfluss auf die Felder zumindest prinzipiell denkbar, daher wurden diese ebenfalls vorerst nicht weiter betrachtet.

### 2.3.4 Lagekontrolle für die primären Targets

Neben einer Positionskontrolle des verfahrbaren Tisches ist auch eine Rückmeldung zur aktuellen Lage der Targets notwendig. Es muss sichergestellt sein, dass der Aufbau nur in Strahlrichtung verfahren kann, wenn alle Targets vollständig auf ihre Lagerungspositionen zurückgefahren sind. Andernfalls könnte durch das Verfahren ein Target beschädigt werden oder gar in der Strahlröhre abbrechen.

Idealerweise wäre dies mit denselben Hardwarekomponenten zu bewerkstelligen wie beim z-Positionssensor, um die Kompatibilität der Hardware möglichst groß zu halten. Eine grundlegende Lagekontrolle lässt sich z.B. mit den bereits präsentierten Sensorsystemen umsetzen.

---

<sup>3</sup>Lichtwellenleiter

Es können mechanische Schalter verwendet werden, die den Kontakt der Targets an einem Anschlag detektieren. Genau so gut kann auch eine Lichtschranke aufgebaut werden, die unterbrochen wird, wenn ein Target nicht vollständig eingefahren ist.

Beide Methoden wurden auf ihre Eignung hin untersucht [Boe17].

## 2.4 Entwicklung eines neuen Prototypens

Während dieser ersten Entwicklung wird als primäres Merkmal die Größe des Aufbaus berücksichtigt, d.h. es wird versucht alles so kompakt und klein wie möglich zu gestalten. Gleichzeitig müssen aber die oben genannten Anforderungen erfüllt bleiben. Aufgrund der unkomplizierten Beschaffung wurde für erste Tests die Verwendung von mechanischen Tastern als Positionsensormsystem geplant. Die nachfolgende Entwicklung geht daher von deren Verwendung aus. Zur Entwicklung des Prototypens wird die CAD<sup>4</sup>-Software Autodesk Inventor 2015 verwendet.

Für die im Weiteren verwendeten Bezeichnungen gelten folgende Konventionen:

- Gesamtaufbau/Aufbau: Die Gesamtheit des Primärtargetsystems ohne Vakuumkammer, Strahlröhre oder Sekundärtarget
- Schlittenaufbau: Der in z-Richtung mobile Teil des Gesamtaufbaus
- Unterbau: Die unbeweglichen Komponenten des Gesamtaufbaus, auf denen der Schlitten mit seiner Schiene montiert ist, beinhaltet als Basis die Grundplatte, welche später innerhalb der Vakuumkammer fixiert werden muss
- Vorne: Entspricht der dem Strahl zugewandten Seite
- Oben: Bezeichnet die dem Unterbau abgewandte Seite

### 2.4.1 Halterung für die Piezomotoren

Die direkte Montage der Piezomotoren auf einem fahrbaren Tisch, wie in den vorherigen Entwürfen, ist aufgrund der Höhe der neuen Motoren nicht möglich. Daher ist ein neues Konzept erforderlich. Möglich wäre die liegende Montage der Piezomotoren, dies hätte aber zum einen den Nachteil, dass bei gleicher Anzahl von Targets die Breite des Tisches deutlich ansteigen würde. Des Weiteren sind die Motoren nicht für transversale Belastungen der Antriebsstangen geeignet. Entlang der z-Richtung des Motors (siehe Abb. 2.2) kann eine solche noch durch die Lager der Stange im geringen Maße gehalten werden, in y-Richtung jedoch kann die Stange um  $\approx 10^\circ$  verkippen. Es wäre somit zusätzlich eine Führung für die Antriebsstange notwendig.

Aus diesen Gründen ist die Entscheidung zu einem stehenden Einbau gefallen. Um dennoch die vorgegebene Höhe einzuhalten, muss daher eine eigene Halterung für die Motoren verwendet werden. Möglich wären zum einen, eine passende Extrusionen im

---

<sup>4</sup>Computer Assisted Design

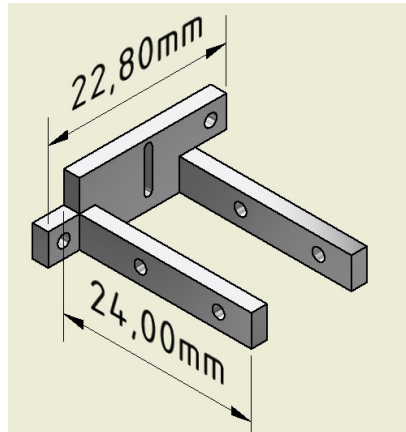


Abb. 2.8: Prototyp der Motorenhalterung

Schlittenaufbau mit einer seitlichen Verschraubung. Dies hätte allerdings den Nachteil, dass die mittleren Motoren nur schwer mit Schrauben zu fixieren wären und dass bei einer späteren Änderung der Motorenkonfiguration eine komplette Neuentwicklung nötig würde.

Alternativ ist es auch möglich, eine für den Motor angepasste Halterung zu designen, die den Motor mit dem Aufbau verbindet. Dies erhöht die Flexibilität, da bei einer späteren Änderung der Abmessungen der Motoren, hier lediglich die Halterung getauscht werden muss, nicht jedoch der restliche Schlittenaufbau. Nachteilig ist jedoch, dass hierdurch die Anzahl an Komponenten steigt und höhere Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit notwendig werden. Insbesondere ist jede Schraubstelle eine potentielle Fehlerstelle, die zu schiefen Verbindungen führen kann. Dieses Problem ist durch genaue Fertigung vermeidbar und der Vorteil sollte überwiegen.

Aufgrund der Kabel im hinteren Bereich der Motoren benötigt die Halterung einen entsprechenden Ausschnitt, durch den die Kabel geführt werden können. Insgesamt handelt es sich bei der Halterung um ein sehr filigranes Bauteil, allerdings muss sie auch keine großen Belastungen tragen. Die Halterung aus Aluminium wird mit vier seitlichen Schrauben fest mit dem Motor aus Titan verbunden. Dies sollte ihr bereits eine ausreichend große Stabilität gegen Verbiegen geben.

Da die Motoren zuerst in ihren Halterungen verschraubt werden können, bevor diese am Aufbau verbaut werden, ist auch eine sehr viel dichtere Packung der Motoren möglich. Die Verschraubungen zum Aufbau hin sind derart angeordnet, dass sich jeweils zwei Halterungen einen Befestigungspunkt am Aufbau teilen, um einen minimalen Abstand zwischen den Motoren zu realisieren.

Ein Prototyp für die Motorhalterung ist in Abb. 2.8 gezeigt.

#### 2.4.2 Erster Prototyp für den Piezo LEGS<sup>®</sup>

Der erste Schritt ist ein Nachbau des bereits bestehenden Prototypens angepasst an die neuen Maße. Weiterhin verwendet wird der elliptische HR1- Motor für die Be-

wegung des Schlittens. Begonnen wird mit der Annahme, dass die Unterkante der Primärtarget-Motoren (Piezo LEGS<sup>®</sup>) auch die Untergrenze zur Vakuumkammer darstellt. Dies ist notwendig um die 19,3 mm hohen Motoren im vorhandenen Platz von 20 mm unterzubringen. Da über und unter der Strahlröhre zudem die Silizium-Streifendetektoren planar aufliegen, ist zudem keine Höhenänderung der Vakuumkammer im vorderen Bereich möglich.

Da die Antriebsstangen der Motorn im vollständig eingefahrenen Zustand hinter dem Motor hervortreten, muss der Schlittenaufbau ausreichend Platz zur Verfügung stellen. Der Schlittenaufbau wurde daher von der Höhe her so gewählt, dass die Antriebsstangen noch über den Aufbau passen. Zusätzlich wurden Führungsnuten in der Oberfläche des Aufbaus gelassen, damit der Motor bzw. seine Antriebsstange beim Rückwärtsfahren gerade ausgerichtet wird.

Die ersten Tests sind mit mechanischen Schaltern als Sensoren geplant. Deshalb werden zusätzlich mechanische Taster hinter den Motoren plaziert, welche schließen, wenn diese vollständig zurückgefahren sind. Die CAD-Modelle der verwendeten Taster (Kontaktschalter ST221A der Firma Misumi) wurden durch den Hersteller zur Verfügung gestellt.

Als Führungsschiene inklusive Schlitten wird für den Aufbau die „LLMHS 7 LA“ der Firma SKF aus Schweden verwendet. Dabei handelt es sich um eine Profilschienenführung mit geschmiertem Kugellager. Auch hierzu wurden CAD-Modelle seitens der Firma bereitgestellt. Diese sind für Vakuumanwendungen nicht geeignet, aber für erste Tests ausreichend, da hierzu der Aufbau nicht im Vakuum getestet werden wird.

Der erste Prototyp ist in Abb. 2.9 dargestellt. Da für Kontaktschalter und Schlittenantrieb mehr Platz benötigt wird, wurde auf Höhe der Führungsschiene eine Stufe in der Bodenplatte eingeplant. Auf diese Weise wird der Aufbau zwar höher, allerdings ist die Kante bereits ausreichend weit von den Streifendetektoren entfernt (siehe Abb. 1.12).

Direkt hinter den Motoren, noch vor der Schiene, ist ein Kabelkanal geplant. Dessen Größe hat sich als unpraktikabel groß erwiesen. Da jede der sechs Kabeladern von den Motoren einen Querschnitt von 0,7 mm hat, würden 36 Adern einen Kabelkanal von mindestens 46,2 mm<sup>2</sup> benötigen<sup>5</sup> und somit bei einer Höhe von 7 mm fast einen Zentimeter der sowieso knappen Gesamtlänge kosten.

Auch wird schnell klar, dass eine Verwendung des HR1-Motors problematisch ist. Bedingt durch die Länge der Piezo LEGS<sup>®</sup> in x-Richtung, sowie der notwendigen Längen für die Lagerung von Targets und der Schiene (zusammen 125,7 mm) würde der Aufbau nur sehr knapp in 150 mm unterzubringen sein. Wie in Abbildung 2.10 zu sehen ist, werden derzeit bereits 14,97 cm für den Aufbau benötigt. Zudem muss auf der Rückseite noch die Wand einer Vakuumkammer untergebracht werden. Außerdem wird hinter dem Aufbau auch noch etwas Platz gebraucht: Für die Verlegung von Kabeln; zudem sind die Positionssensoren der z-Richtung noch nicht untergebracht.

---

<sup>5</sup> Bedingt durch die nicht bündige Packung wahrscheinlich mehr.

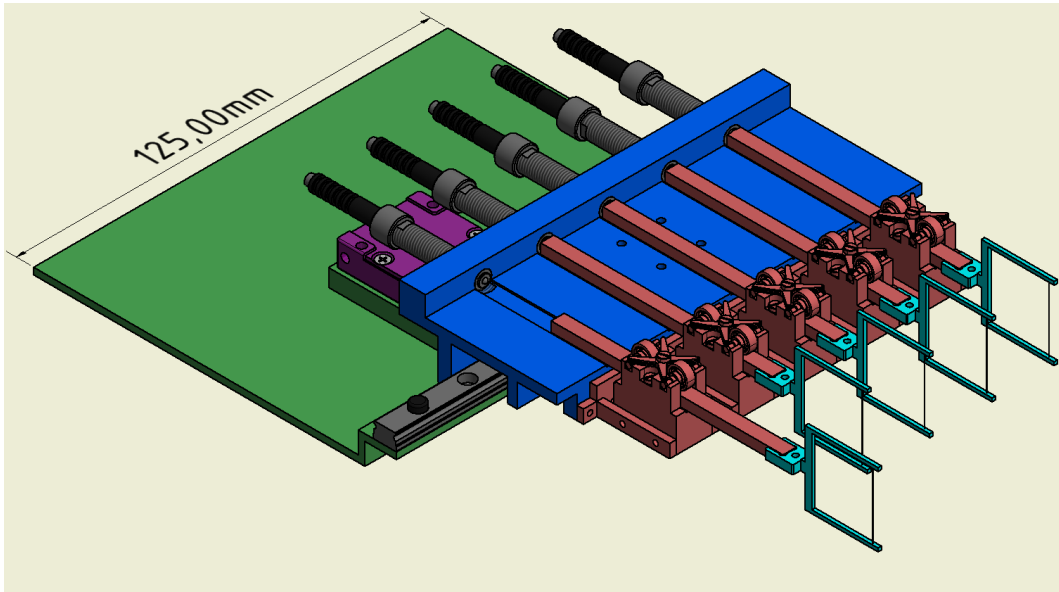


Abb. 2.9: Der erste Prototyp des mechanischen Aufbaus: In rot die Piezo LEGS<sup>®</sup> Motoren mit montierten Targets, die auf dem verfahrbaren Tisch (Blau) montiert sind und auf der Rückseite zur Positionskontrolle gegen Kontaktschalter fahren. Der Gesamtaufbau ist auf einer Bodenplatte montiert (Grün), welche ihrerseits mit der Vakuumkammer verbunden würde. In lila ist der HR1-Motor zu erkennen, der die laterale Bewegung ermöglicht.

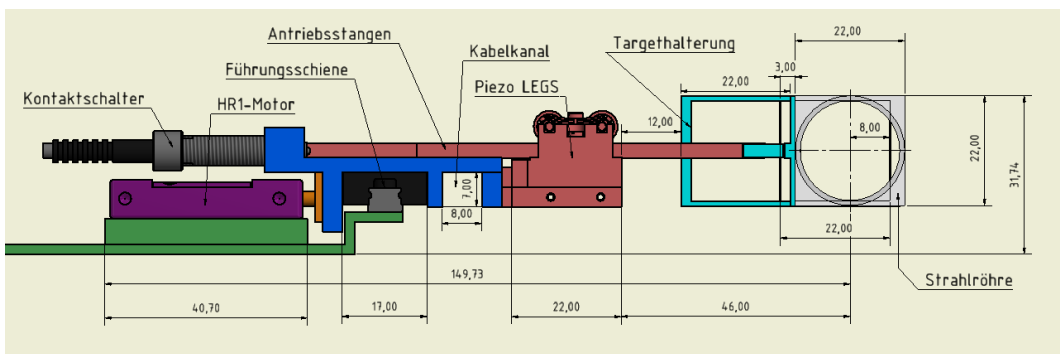


Abb. 2.10: Seitenansicht des ersten Prototypens mit Angabe der radialen Maße, alle Angaben in mm. Zu sehen ist, dass die Gesamtlänge des Aufbaus, trotz der gewählten kompakten Bauweise, die zur Verfügung stehende Ausdehnung von 15 cm bereits erreicht. Da noch eine Vakuumkammer eingeplant werden muss, ist der Aufbau daher zu groß.

Des Weiteren ist die Montage der Motorenhalterungen direkt am Aufbau ungünstig. Ein Adapter zwischen Schlitten und Halterungen ermöglicht Veränderungen der Anordnung ohne jedes mal neue Bohrungen, am relativ komplexen und daher schwierig zu fertigenden Schlittenaufbau zu benötigen.

Aufgrund der sich häufenden Probleme wurde an dieser Stelle entschieden, einen neuen Prototypen zu entwickeln und das bereits Gelernte von Beginn an zu berücksichtigen.

### 2.4.3 Zweiter Prototyp mit Piezo LEGS<sup>®</sup>

Das erste Design hatte eine Liste von Problemen aufgeworfen, welche genauer betrachtet werden mussten. Dies waren:

- Länge des Gesamtaufbaus:  
Deutlich wurde nach den ersten Versuchen bereits, wie knapp die verfügbare Länge in x-Richtung tatsächlich ist. Die benötigten Längen für die Targets inklusive ihrer Ruhelagen ist durch die Konfiguration der Strahlröhre festgelegt. Kombiniert mit der Breite von Schiene inklusive Schlitten sowie der Länge der Piezomotoren werden bereits mindestens 85 mm benötigt. Mit zusätzlichen 10 mm Sicherheit nach hinten für Kabel, bleibt prinzipiell nicht viel Länge zum Einbau von Sensoren. Das Design muss demnach primär in x-Richtung kompakt sein, eine größere Höhe muss gegebenenfalls im hinteren Bereich hingenommen werden.  
  
Falls nötig wäre es auch denkbar einzelne Komponenten aufrecht zu verbauen, um Länge zu sparen. Beispielsweise könnte die Schiene gekippt eingebaut werden; allerdings würde dies zu einer einseitigen Belastung der Lager führen. Andere Kandidaten wären der Antrieb oder die Sensoren. Insbesondere letztere würden allerdings zu einem enormen Anstieg der Höhe führen.
- z-Antrieb:  
Aufgrund der Längenproblematik bei der Verwendung des HR1-Motors wurde ein neuer Antriebsmotor gesucht. Praktischerweise war ein geeigneter Antrieb mit den neuen Piezo LEGS<sup>®</sup>-Motoren bereits vorhanden. Diese sind werksseitig mit einer Antriebsstange von bis zu 100,8 mm erhältlich, was einen ausreichenden Fahrweg (von bis zu 80 mm) für fünf Targets sicherstellt. Da es sich hierbei um einen linearen Piezomotor handelt, muss entsprechend die Keramikplatte für den elliptischen Antrieb gegen eine Halterung zum Einspannen des linearen Antriebs ersetzt werden.
- Kabelführung:  
Die Kabel in einem Bündel von den Motoren zum Rand des Schlittenaufbaus zu führen, erwies sich aufgrund des benötigten Querschnitts als wenig praktikabel. Es war daher naheliegend die Verkabelung der Motoren jeweils einzeln nach hinten zu führen und erst dort zu vereinen. In Erwägung gezogen wurde daher, die gesamte Verkabelung unter die Grundplatte zu führen. Dies könnte

aber potenziell zum Kontakt der Kabel an der vorderen Kante führen und auf Dauer die Isolierungen beschädigen. Des Weiteren müsste bei dieser Art der Führung ausreichend Platz zwischen Unterbau und der später folgenden Vakuumkammer gegeben sein, was dem Ziel eines möglichst kompakten Gesamtaufbaus entgegen stünde. Alternativ lassen sich die Kabel bei entsprechendem Design auch durch den Schlittenaufbau führen. Die Kabel müssten dann fixiert zwischen den Antriebsstangen geführt werden und entsprechende Kabelkanäle eingeplant werden.

### Entwicklung des Schlittenaufbaus

Basierend auf den Überlegungen zur Kabelführung wurde entschieden, den Schlittenaufbau in mehrere Einzelkomponenten zu zerlegen. Dies sollte die Fertigung vereinfachen: Zum einen wird bei Fertigungsfehlern bzw. späteren Änderungen nicht jedes Mal ein kompletter Neubau nötig, sondern der Austausch einzelner Komponenten würde ausreichen. Zum anderen kann die Struktur ohne Probleme derart gebaut werden, dass in ihrem Inneren Hohlräume für die Verkabelungen verbleiben. Der Schlittenaufbau des zweiten Prototypens wurde daher in drei Komponenten zerlegt. Diese werden im Folgenden als Schlittenbasis, Schlittenabdeckung und Motoradapter bezeichnet.

**Motoradapter** Der Motoradapter bietet Platz für fünf Piezo LEGS<sup>®</sup> Halterungen und kann mit der Schlittenbasis verbunden werden. Die Motorhalterungen werden hierbei an hervorstehende Sockel verschraubt, sodass hinter den Halterungen etwas Platz für den Biegeradius der Kabel verbleibt. Ferner sind die Kanten hinter den Motoren gefast, um eine Beschädigung von Kabelisolierungen zu vermeiden. In Abbildung 2.11 ist das entsprechende CAD-Modell gezeigt.

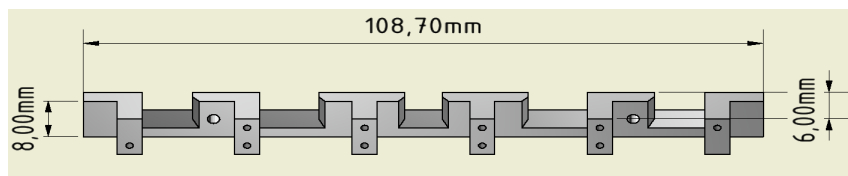


Abb. 2.11: Prototyp des Motoradapters

**Schlittenbasis** Die Schlittenbasis dient der Verbindung der verschiedenen Komponenten des Aufbaus. Die Basis wird direkt auf den Schlitten der Führungsschiene montiert, um die notwendige Beweglichkeit zu erreichen. An ihr wird der Motoradapter und damit die Motoren inklusive Targets montiert.

Es wird deshalb mit einer passgenauen Platte begonnen, welche auf die Führungsschiene geschraubt werden kann. An dieser werden auf der Rückseite zwei Streben



eingepplant, welche zum Verbinden mit einem auf der Seite liegenden Piezo LEGS<sup>®</sup>-Motor geeignet sind. Durch die liegende Montage wird die benötigte Einbauhöhe minimiert. Die Höhe der Bohrung muss entsprechend an die Höhe der Antriebsstange angepasst sein um, eine schiefe Einspannung zu vermeiden, welche die Keramik-Antriebsstange möglicherweise brechen lassen könnte. Durch die Montage der Antriebsstange an zwei fixen Punkten soll ein ungleichmäßiger Antrieb des Schlittens vermieden werden.

Ebenfalls an den Streben, noch über dem Antrieb, wird Platz für eine 7,5 mm hohe Platte gelassen. An dieser Stelle soll später für verschiedene Positionssensor-Umsetzungen die entsprechende Logik montierbar sein. Da geplant ist, hier verschiedene Systeme auf ihre Funktion hin zu untersuchen, sollte ein Austausch der Logik mit geringem Aufwand möglich sein.

Die ebenfalls auf der Rückseite vorhandene Rasterung folgte aus der ursprünglichen Überlegung einer Arretierung des Tisches. Hier sollte eine Haken-Konstruktion eingreifen, um den Schlitten auf den richtigen Positionen zu fixieren. Eine Umsetzung war letztlich nicht notwendig, da die Motoren im Stand ausreichend Widerstand gegen externe Kräfte leisten, und damit eine Verschiebung verhindern.

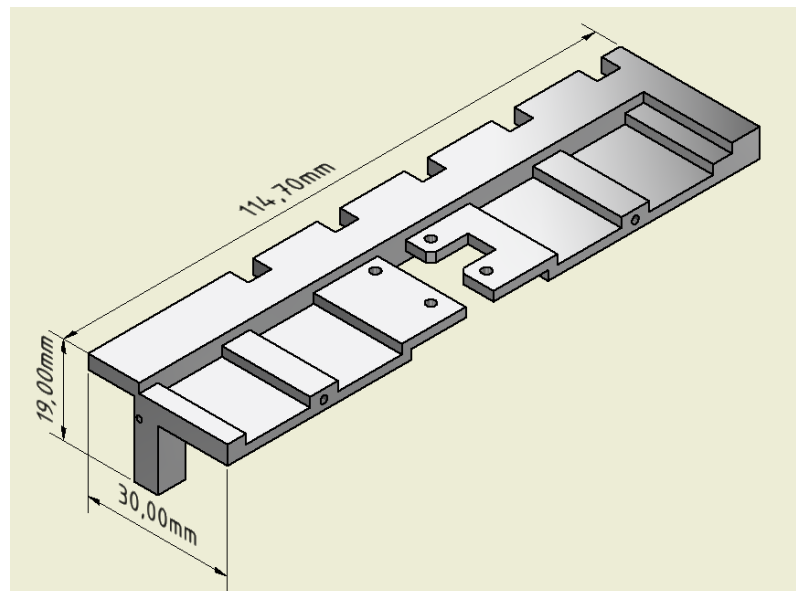


Abb. 2.12: Prototyp der Schlittenbasis

Die restliche Oberseite der Basis wurde ausgehöhlt, um in Kombination mit der Abdeckung Hohlräume für Kabel zu lassen. Dabei wurden kleine Stege gelassen, sodass die Abdeckung eine Auflage findet. Ferner wurde ein L-förmiger Rand stehen gelassen, sodass beim Zusammenbau die Teile zusammengesteckt werden können und sich Einzelkomponenten beim Verschrauben nicht verdrehen können. Problematisch war hierbei lediglich die Mitte des Aufbaus. Hier konnte das Material nicht ausgehöhlt werden, da der Schlitten der Führungsschiene hierunter sitzt. Daher wurde nur

das nötigste ausgeschnitten, sodass weiterhin eine Verschraubung mit der Schiene möglich ist aber trotzdem die Kabel geführt werden können.

**Schlittenabdeckung** Die Abdeckung wurde passgenau zur Basis entworfen. Das Prinzip entspricht dem aus dem ersten Design, mit Führungsnuten für die Antriebsstanges und im hinteren Bereich Halterungen für mechanische Taster. Mit abgerundeten Bohrungen zwischen den Führungen der Antriebsstangen sollte es möglich sein, die Kabel nach oben zu führen und durch Bohrungen zwischen den Tastern parallel verlaufend nach hinten zu legen. Dort können Motoren- und Tasterverkabelungen in einen Kabelbaum zusammengeführt werden.

Die Form der hinteren Kante ist zwei Überlegungen geschuldet: Zum einen müssen die mechanischen Taster mit Kontermuttern verschraubt werden, um sie fest in ihrer Position zu halten. Hierzu wird etwas mehr Platz im Bereich der Taster benötigt.. Zum anderen ist eine weitere glatte und ununterbrochene Oberfläche parallel zur Grundplatte erforderlich, an der der Maßstab des optischen Positionssensors verklebt werden kann. Zusätzlich muss unter dem Maßstab ausreichend Platz für den Positionssensor vorhanden sein. Dies führte zu der in Abbildung 2.13 sichtbaren Form, welche ohne Positionssensor entfallen würde.

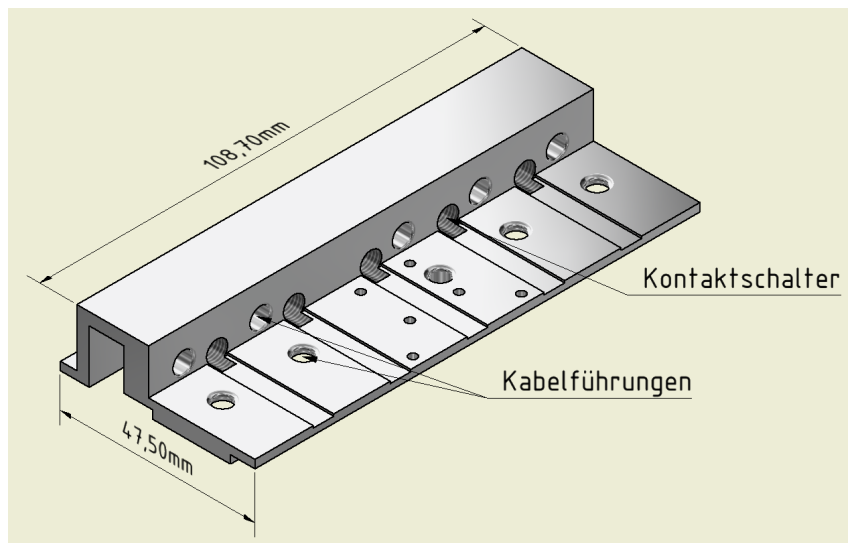


Abb. 2.13: Prototyp der Schlittenabdeckung

### Der Unterbau

In diesem Abschnitt wird auf die zum Schlittenaufbau passende Konstruktion des Unterbaus eingegangen. Dieser muss den Motor und die Positionssensoren für die z-Richtung unter dem Schlittenaufbau unterbringen und dabei möglichst flach bleiben.

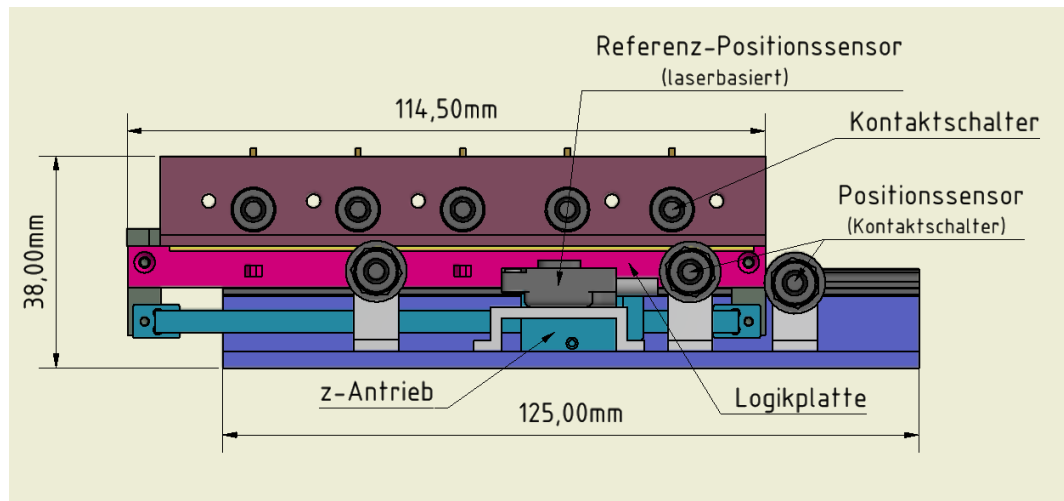


Abb. 2.14: Rückwärtige Ansicht des CAD-Modells des zweiten Prototypens; mit dem z-Antrieb in türkis sowie der Logikplatte in magenta. Die Ansicht zeigt die Kompaktheit des Aufbaus. Man beachte z.B. den Abstand zwischen Schlitzenabdeckung (rot) bzw. Antriebsstange des z-Antriebs und den Kontaktschalter für den Positionssensor.

In Abbildung 2.14 ist der fertige Aufbau von hinten zu sehen. In türkis dargestellt ist der liegende z-Motor, der an den beiden Kontaktpunkten des Schlittenaufbaus verbunden wird. Der Motor liegt so nahe wie möglich an der Schiene und ist daher nur im Hintergrund erkennbar. Die in blau dargestellte Bodenplatte dient lediglich der Fixierung der einzelnen Komponenten. In späteren Versionen ist hier die Fixierung in der Vakuumkammer geplant.

### Umsetzung der mechanischen Schalter als Positionssensoren

Bei den verwendeten Schaltern handelt es sich um „normal offene“-Modelle. Ziel ist es eine Logik zu konstruieren, mit der die Lage bestimmt werden kann. Um die Bewegung des Schlittenaufbaus für die Taster sichtbar zu machen, wird eine Logikplatte verwendet.

Diese besteht aus einer Aluminiumplatte mit Erhebungen im Abstand der Targets, zum Erstellen einer binären Logik. Um insgesamt sechs Zustände auflösen zu können (fünf Targetpositionen sowie eine Zwischenposition), werden drei Taster benötigt. Für Schalter, die entsprechend in Abb. 2.14 im Unterbau platziert sind, kann dann als Schaltlogik, die in Tabelle 2.1 dargestellt, gewählt werden. Auf diese Weise werden alle Positionen eindeutig erkannt, durch einen Versatz der Schalter-Befestigungen ist auch eine Justage der Positionen relativ zu den Targets möglich. Die aus der Schaltlogik folgende Logikplatte ist in Abb. 2.15 dargestellt.

Ein großes Problem mechanischer Taster ist ihre Wiederholgenauigkeit. Es bleibt abzuwarten, ob mit einer entsprechenden Justage ein zufriedenstellendes Ergebnis

| Schlittenposition | Schalter1 | Schalter2 | Schalter3 |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| keine             | 0         | 0         | 0         |
| 1                 | x         | 0         | 0         |
| 2                 | x         | x         | 0         |
| 3                 | x         | x         | x         |
| 4                 | 0         | x         | x         |
| 5                 | 0         | x         | x         |

Tab. 2.1: Aufbau der Geometrien bei einer Logikplatte mit der in Abb. 2.14 gezeigten Positionierung der Schalter

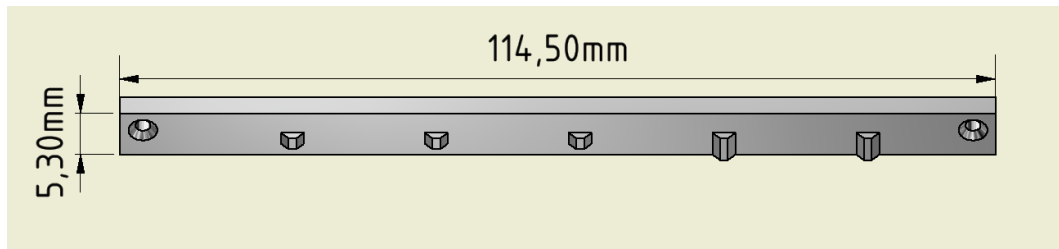


Abb. 2.15: Logikplatte für mechanische Schalter auf zwei verschiedenen Höhen, entsprechend der Schaltlogik aus Tabelle 2.1

erreicht werden kann. Insbesondere, da die Schalter von einem sich seitlich bewegendem Schlitten ausgelöst werden. Das auf die Schalter wirkende Drehmoment kann zu einem Verdrehen der Schalter und somit zu Fehlern führen. Folglich müssen die Schalterhalterungen besonders stabil konstruiert sein. Es werden pro Taster zwei Haltestrukturen verwendet, die den Schalter möglichst weit vorne und hinten einspannen um einer Verdrehung bestmöglichst entgegen zu wirken. Indem die Verschraubungen der Halterungen in der Bodenplatte anstelle von Bohrungen mit Rundlöchern ausgelegt werden, ist auch eine Feinjustage in z-Richtung möglich.

Wie bereits erwähnt, soll der laserbasierte Positionssensor ebenfalls untergebracht werden, dieser wird daher direkt vor dem z-Antrieb mittig plaziert. Auf diese Weise kann der Positionssensor die gesamte Länge des Maßstabs ablesen. Aufgrund der Anforderungen des Positionssensors bzgl. des Abstands zum Maßstab ist eine eigene Haltestruktur erforderlich. Diese ist auch in Abbildung 2.6 als einfache Aluminiumstruktur zu erkennen.

## 2.5 Mechanische Umsetzung der CAD-Modelle

Mit Abschluss der Entwicklung des zweiten Prototypens, der nun alle gestellten Anforderungen erfüllt, wird aus diesem ein reales 1:1 Modell mittels 3D-Druck erstellt. Erste Untersuchungen zur Passgenauigkeit der einzelnen Komponenten, der Kabelführung sowie grundlegende Fahrtests werden an diesem durchgeführt. Die hierdurch gewonnen Erkenntnisse werden für eine letzte Fehlerkorrektur des CAD-Modells ver-

wendet, bevor dieses durch die feinmechanische Werkstatt des Instituts für Kernphysik aus Aluminium gefertigt wird.

### 2.5.1 CAD-Modell des vollständigen Prototypens

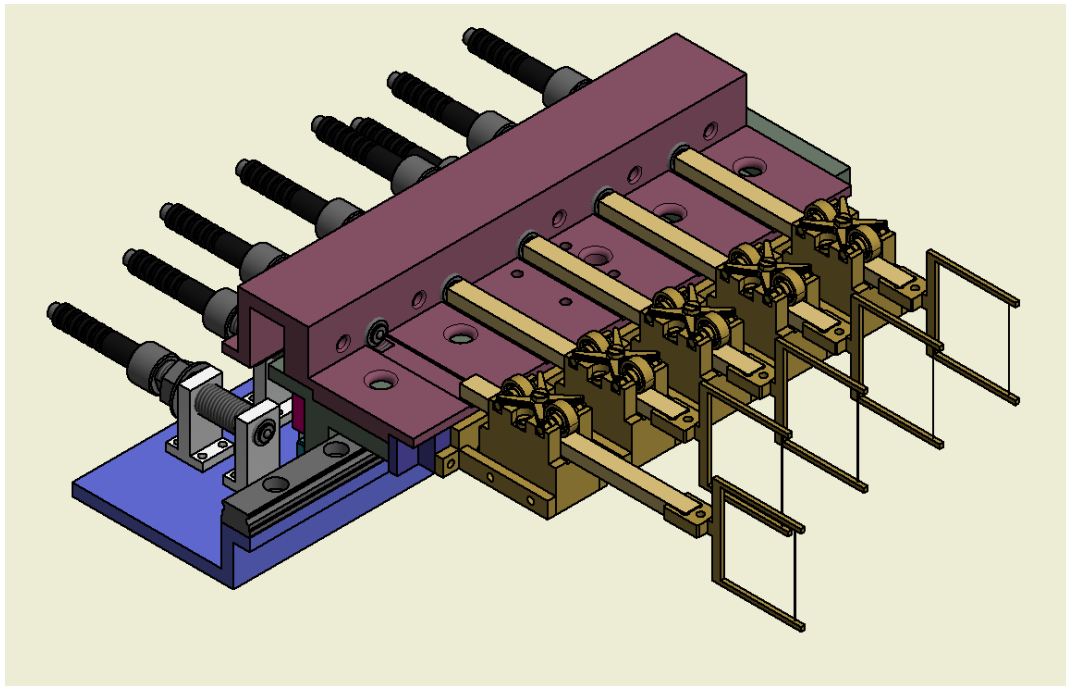


Abb. 2.16: CAD-Modell des vollständigen zweiten Prototypens. Der erste Motor ist bis zur Ruheposition des Targets in der Strahlröhre ausgefahren. Gut sichtbar ist zudem die Halterung der Kontaktschalter für die z-Positionierung. Durch zwei Halterungen wird eine stabile Ausrichtung der Schalter auch bei seitlichen Belastungen möglich.

In Abb. 2.16 ist das CAD-Modell des fertigen Gesamtaufbaus zu sehen. Mit einer x-Länge von 13,17 cm ist der Gesamtaufbau inklusive alle geforderten Komponenten, deutlich innerhalb der Maximallänge (siehe Abb. 2.17). Dabei ist der Aufbau im hinteren Bereich nur um einen Zentimeter höher geworden. Die Anforderungen an die Dimensionen sind somit alle erfüllt.

Fraglich ist allerdings, ob die Biegeradien der Kabelführungen ausreichen und der Durchmesser aller Durchführungen groß genug gewählt wurde. Der nächste Schritt ist daher, das bisherige CAD-Modell mittels 3D-Drucker auszudrucken und sich von der Funktionalität der bisherigen Entwicklung zu überzeugen.

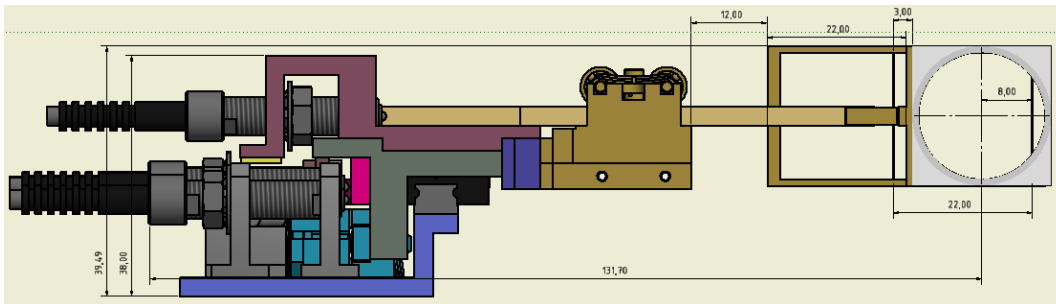


Abb. 2.17: Seitenansicht zum zweiten Prototypen mit Bemaßung. Im Vergleich zum ersten Prototypen ändert sich im Bereich der Strahlröhre und Targets nichts. Lediglich im hinteren Bereich ist durch eine kompaktere Anordnung und die Verwendung anderer Komponenten die Länge reduziert worden. Die Farbgebung entspricht sonst der aus Abb. 2.14.

### 2.5.2 Polyethylen-Modell aus 3D-Druck

Für den ersten Eindruck jenseits eines CAD-Modells zu erhalten, wird der Prototyp mit einem 3D-Druck in Schmelzschichtverfahren (besser bekannt als FMD - Fused Deposition Modeling) in Polyethylen (PE) gefertigt. Der Ausdruck erfolgt maßstabsgetreu im Verhältnis 1:1. Dabei wird auf einen Ausdruck des Unterbaus verzichtet, da weder die Halterungen noch die Bodenplatte im Falle eines Ausdrucks neue Erkenntnisse zu der mechanische Funktionalität liefern.

Der Verarbeitungsqualität des Ausdrucks ist ausreichend gut, sodass die einzelnen Teile bereits ohne größere Nachbearbeitungen zusammengebaut werden können. Die Übereinstimmung aller Bohrungen und Kanten ist überzeugend und keine Designänderungen notwendig. Der entsprechende Prototyp, inklusive einiger Modifikationen, ist in Abb. 2.18 dargestellt.

Im nächsten Schritt werden alle vorhandenen Bauteile zusammengebaut, d.h. es wird einer der Piezo LEGS<sup>®</sup>-Motoren in eine Motorhalterung geschraubt und diese mittig am Motoradapter montiert sowie der Schlittenaufbau komplett zusammengesetzt und auf der Schiene befestigt. Das Gewicht des Motors führt dazu, dass sich der Motoradapter in sich verdreht. Vermutlich ist hierbei die geringe Stabilität des PE verantwortlich und in einer Aluminiumversion wird dies keine Probleme bereiten.

Eine Verdrehung an dieser Stelle wäre nicht tolerierbar, da dadurch die Antriebsstangen der Motoren nicht auf der Schlittenabdeckung aufliegen würden und, wie bereits beim Plastikmodell erkennbar, durch den Winkel nicht mehr korrekt auf die Taster drücken können. Daher wurde zur Sicherheit der Adapter überarbeitet und mit senkrechten Verschraubungen versehen (siehe Abb. 2.19). Diese sollen zusätzliche Stabilität gegen das Gewicht der Motoren bringen, indem eine Fixierung gegen die Schlittenabdeckung ermöglicht wird.

Sollte dieses Problem auch in der Aluminium-Ausführung auftauchen, wäre eine potentielle Abhilfe, die Motoren mit einer zusätzlichen Verbindung zwischen Motoren

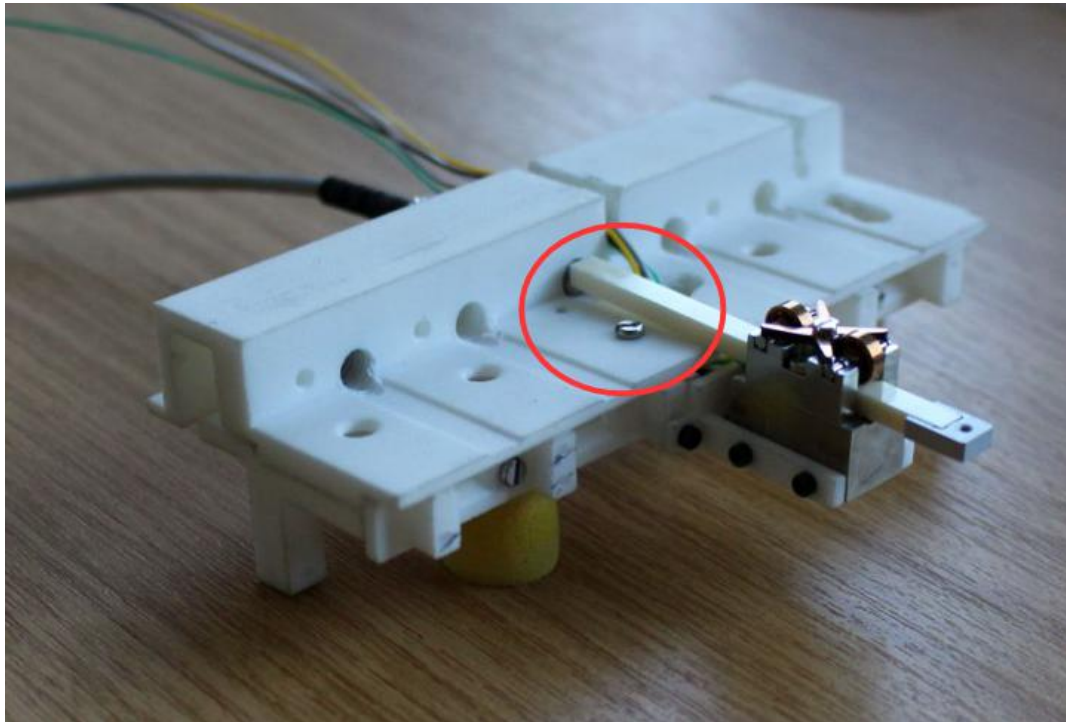


Abb. 2.18: Erster Prototyp aus PE. Um die Verkabelung zu testen, ohne die werkseitigen Stecker entfernen zu müssen, mussten die Kabelkanäle entsprechend aufgeschnitten werden. Zusätzlich beobachtet man eine Verdrehung des Motoradapters durch das Gewicht des Piezomotors (siehe Abstand zwischen Antriebsstange und Auflage)

und Haltestruktur der mechanischen Taster auf die korrekte Lage zu fixieren. Es wird vorerst auf eine Änderung der Halterung verzichtet bis neue Erfahrungswerte vorhanden sind.

Am montierten Zusammenbau wird als nächstes die Verkabelung entsprechend der vorgesehenen Führungen verlegt. Problematisch hierbei ist, dass die Kabelsätze der Motoren am Ende über einen Stecker verfügen, welcher, bedingt durch seine Form, durch keine für die Kabel vorgesehenen Bohrungen passt. Der Stecker kann derzeit auch nicht entfernt werden, da die Überlegung besteht, die Motoren beim Händler gegen andere Modelle einzutauschen und daher keine Veränderungen an den Motoren möglich sind.

Die Kabelführungen wurde zuerst mit Kabelbündeln aus ähnlichen Kabeln getestet. Dabei konnten das Prinzip verifiziert werden.

Um auch die Originalkabel testen zu können, müssen die Stecker durch die Bohrungen geführt werden. Dazu wird eine Kabelführung entsprechend erweitert bzw. aufgesägt. Da auf diese Weise auch die Verlegung der Originalkabel ohne weitere

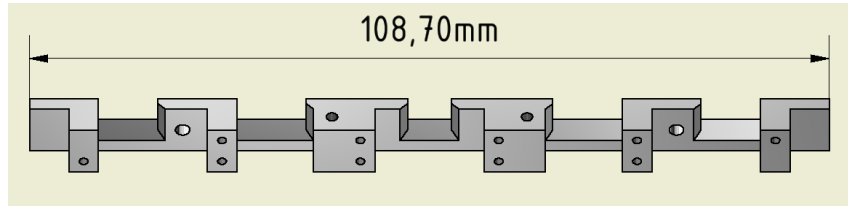


Abb. 2.19: Überarbeitete Version des Motoradapters. Die zusätzliche Verschraubung in y-Richtung verhindert eine Verdrehung des Adapters durch die Last der Piezomotoren.

Probleme möglich ist, ist von einem funktionierenden Design bezüglich der Kabelführung auszugehen.

Damit sich der Schlitten bei montiertem Schlittenaufbau frei bewegen lässt, müssen die Endanschläge der Schiene entfernt werden. Dies ist in sofern ungünstig, da das Lager des Schlittens bei einem Verlassen des Schlittens Schaden nehmen würde, worauf der Hersteller explizit hinweist. Mit montiertem z-Motor sollte ein Herunterlaufen jedoch, bedingt durch die feste Verbindung mit der Antriebsstange des Motors, unmöglich sein.

Zusammengefasst zeigten sich beim 3D-Druck keine größeren Probleme, daher kann der Gesamtaufbau zur Fertigung in der feinmechanischen Werkstatt gegeben werden.

### 2.5.3 Aluminiummodell des Prototypens

Alle Einzelkomponenten des zweiten Prototypens werden mittels CNC-FräSENS aus Aluminium hergestellt. Bei diesem Verfahren ist es jedoch nicht möglich rechte Winkel zu fertigen, im CAD-Modell wurde diese jedoch mehrfach vorausgesetzt. Für die zukünftige Entwicklung sollte dies bereits beim Design berücksichtigt werden und nach Möglichkeit auf passgenaue rechte Winkel verzichtet werden.

Die Einzelkomponenten werden für erste Tests teilweise montiert: zuerst nur ein Motor als x-Antrieb sowie die mechanischen Taster als z-Positionssensor wie in Abbildung 2.20.

Bereits beim ersten praktischen Test zeigt sich, dass die Taster zu diesem Zweck gänzlich ungeeignet sind. Zwar waren die Taster bereits per Hand getestet worden, allerdings wurde die benötigte Kraft zur Auslösung der Taster bei seitlicher Belastung unterschätzt. So ist es dem Piezomotor nicht möglich, den Tisch auch nur gegen einen Taster zu verfahren. Selbst beim Verschieben des Tisches per Hand merkt man bereits die Problematik, da die Schalter nur sehr schwer über ihren Auslösepunkt zu bewegen sind.

Bei der Beobachtung der Taster beim Auslösen zeigen sich zudem zusätzliche Probleme. Selbst bei optimaler Justage bezüglich des Abstandes zur Logikplatte, sodass der Schalter nur den minimal nötigen Hub zur Auslösung durchläuft, sind die seitlichen Kräfte auf die Taster bereits so groß, dass sich der Schalter trotz stabiler Halterung sichtbar zur Seite biegt. Somit muss davon ausgegangen werden, dass selbst



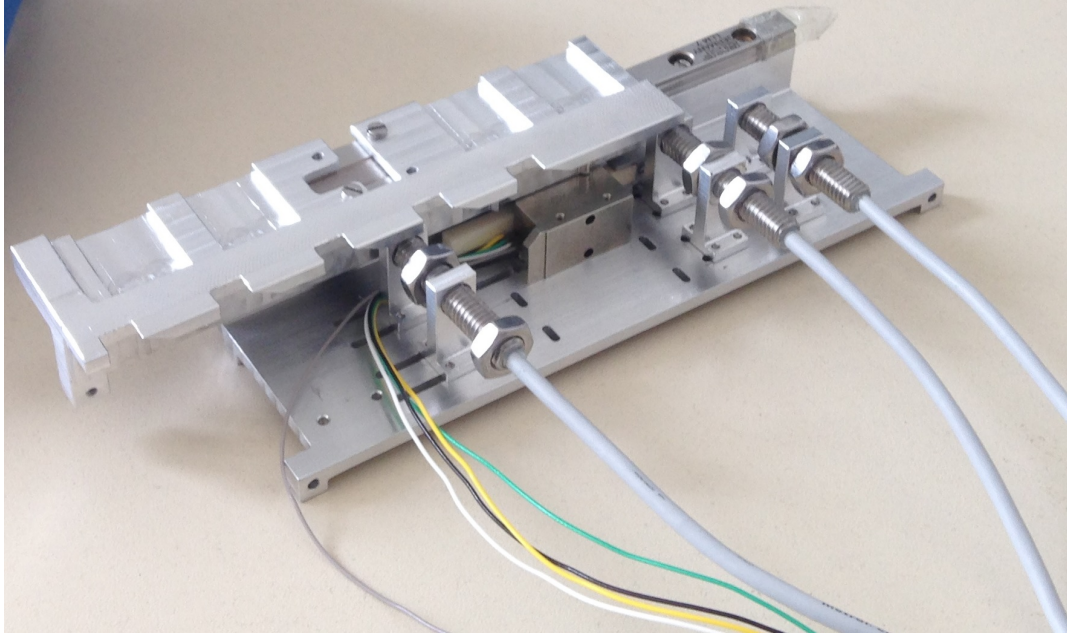
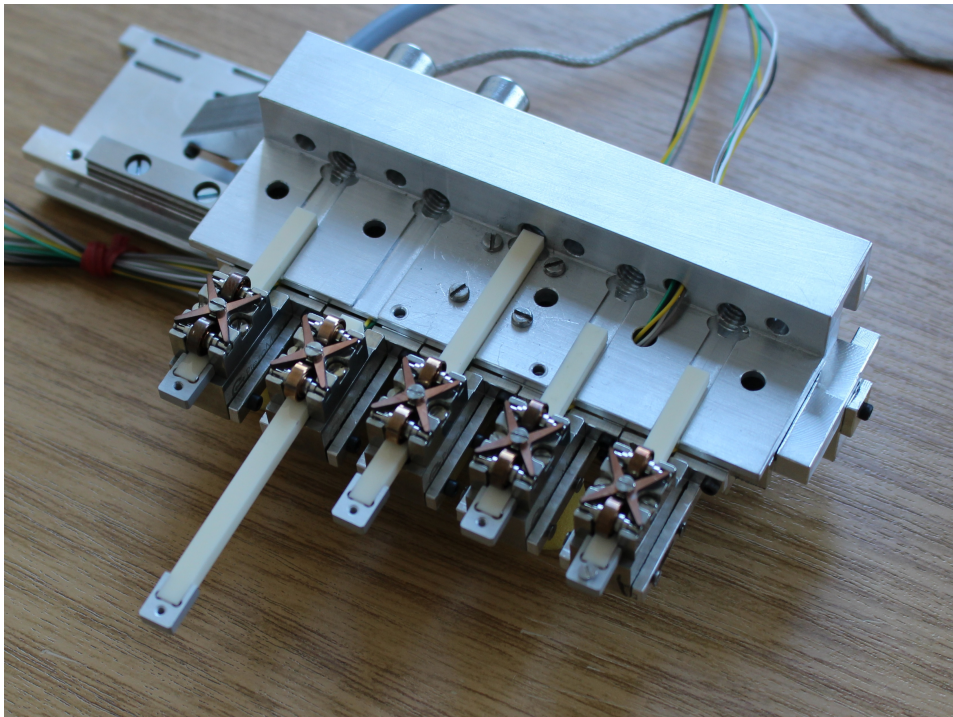


Abb. 2.20: Der aus Aluminium gefertigte Prototyp, teilweise montiert. Erste Tests an diesem Aufbau ergaben, dass die Widerstände der mechanischen Schalter zu groß für den z-Antrieb sind und die Schalter daher als Positionssensor nicht in Frage kommen.

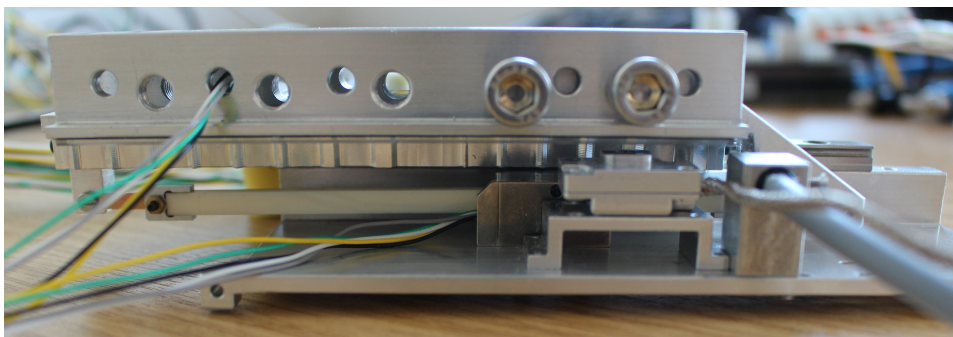
wenn die Motoren den Taster auslösen könnten, die Genauigkeit des Systems absolut unzureichend wäre.

Im Anschluss an die Untersuchung ist außerdem zu sehen, dass nach nur knapp einer Stunde des Experimentierens mit den Tastern, die Logikplatte bereits deutlich sichtbare Kratzspuren auf den Erhebungen zeigte. Da hier mit Kraftaufwand Stahlkugeln über Aluminium geschoben werden, dürfte dies allerdings kaum verwundern. Auf Dauer wäre hier ein härteres Material notwendig, mit den daraus folgenden Konsequenzen für das Materialbudget.

Zusammengefasst werden mechanische Taster daher als Positionssensorsystem verworfen. Zum Abschluss dieses Kapitels ist in Abb. 2.21 noch einmal der gesamte Prototyp mit allen montierten Motoren dargestellt. In grau im Hintergrund ist bereits der montierte Lichttaster zu erkennen, auf den im Folgenden weiter eingegangen wird.



(a) Vorderansicht



(b) Rückansicht

Abb. 2.21: Der neuentwickelte Primärtargetaufbau mit Positionsbestimmung durch Lichttaster. Sämtliche für den Betrieb notwendige Komponenten sind montiert und funktionsfähig.

## 3 Lichtbasierter Positionssensor

Wie in den vorhergegangenen Kapiteln bereits erläutert, wird zur Positionsbestimmung entlang der Strahlachse ein neuer Positionssensor benötigt, der sowohl strahlenthart als auch magnetfeld- und vakuumtauglich sein muss. Nachdem sich mechanische Schalter als problematisch erwiesen haben, die Motoren waren nicht in der Lage deren mechanischen Widerstand zu überwinden, wird im Folgenden die Möglichkeit eines Lichttasters auf Glasfaserbasis untersucht.

In diesem Kapitel wird das Messprinzip zur Positionsbestimmung durch einen Lichttaster beschrieben. Die dazu ausgewählte Hardware sowie ein experimenteller Aufbau zum Nachweis der Anwendbarkeit wird vorgestellt. Anschliessend werden hieran erfolgte Messungen zur Genauigkeit des Systems präsentiert. Zum Abschluss wird auf die Möglichkeit neben der Positionsauslese weitere Informationen, wie z.B. eine Nummerierung der möglichen Targetpositionen im Ausgangssignal zu verschlüsseln, eingegangen.

### 3.1 Grundprinzip der Positionsbestimmung mittels Lichttaster

Bei einem Lichttaster handelt es sich um eine kompakte Form einer Lichtschranke. Im Gegensatz zu einer klassischen Lichtschranke, bei der ein Element Licht aussendet, während ein weiteres, entferntes Element dieses misst, wird bei einem Lichttaster Emission und Detektion des Lichts in einem kombinierten System bewerkstelligt. Durch Verwendung von Reflektoren kann auch mittels Lichttastern eine Lichtschranke aufgebaut werden. Derartige Messsysteme werden zum Einsatz in anspruchsvollen Umgebungen (z.B. Hochdruck, Hochtemperatur, Vakuum, usw.) auch als faseroptische Modelle ausgeführt. In diesem Fall wird der Tastkopf durch Glasfasern realisiert, und die empfindlicheren elektronischen Komponenten können außerhalb des Einsatzbereichs platziert werden.

Die übliche Anwendung einer Lichtschranke ist es, Hindernisse im Strahlengang festzustellen. Dies kann verwendet werden, um die mechanischen Taster an der Oberseite des mechanischen Aufbaus zu ersetzen. Eine Lichtschranke wäre potentiell ebenso geeignet um sicherzustellen, dass alle Targetmotoren eingezogen sind [Boe17].

Ein weitere Anwendungsmöglichkeit besteht darin, den Lichttaster auf eine reflektierende Oberfläche strahlen zu lassen und die Intensität des reflektierten Lichts zu messen. Wird die Oberfläche entsprechend präpariert, lässt sich dies im Ausgangssignal nachweisen. Für die Verwendung als Positionssensor wird der Lichttaster fest eingebaut und der mechanische Aufbau relativ zum Taster bewegt. Die bereits für me-

chanische Taster vorgesehene Logikplatte (siehe Abb. 2.15) kann dann entsprechend gegen eine geeignete reflektierende Oberfläche ersetzt werden.

### 3.1.1 Die optische Logikplatte

Es wird eine plane Metalloberfläche vor einen Lichttaster gebracht, so dass dieser in Sättigung ist (Ausgangssignal des Tasters im Maximum). Dann kann durch ein Erhebung auf der Oberfläche mit abgewinkelten Seiten ein Teil des Lichts zur Seite weg reflektiert werden. Da dieses Licht dann nicht mehr länger am Taster ankommt, wird dessen Signalpegel fallen. Dieses Prinzip wird in Abbildung 3.1 verdeutlicht.

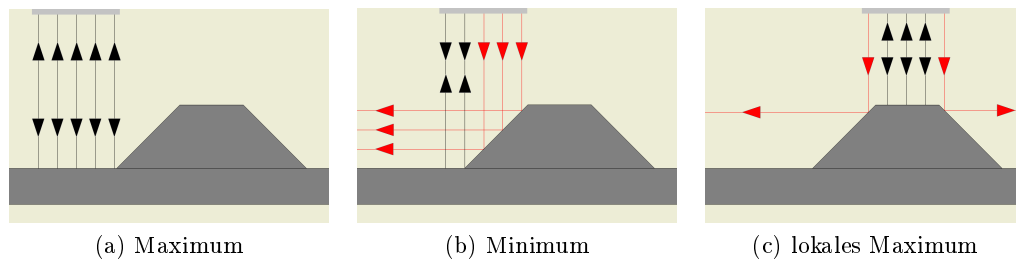


Abb. 3.1: Funktionsprinzip der optischen Logikplatte. Die Platte wird unter dem Tastkopf durchgeschoben. Dabei wird an den Kanten der Oberflächengeometrien das Licht teilweise zur Seite reflektiert. Der Anteil des, durch den Tastkopfes detektierten, Licht sinkt und kann als Signal sichtbar gemacht werden.

Der Lichtstrahl des Tastkopfes fällt auf die reflektierende Oberfläche. In Abb. 3.1a ist das Signal in Sättigung, der gesamte Strahl wird reflektiert. In 3.1b ist eine Schräge in den Lichtstrahl gewandert und reflektiert einen Großteil des Lichts zur Seite weg. Das Signal am Tastkopf geht in ein Minimum, bevor in Abb. 3.1c das Plateau der Erhebung in den Strahl wandert und zu einem erneuten Anstieg im reflektierten Licht führt. Aufgrund der Symmetrie wiederholt sich der Verlauf beim weiteren Verschieben. Es ist eine Struktur aus zwei Minima mit einem dazwischen liegenden lokalen Maximum zu erwarten. Diese kann in Messungen auch gut beobachtet werden, ein entsprechender Signalverlauf ist in Abb. 3.2 dargestellt. Die mit Buchstaben markierten Punkte entsprechen den dazugehörigen Bildern aus Abbildung 3.1.

Die Positionsbestimmung erfolgt über das lokale Maximum. Ebenfalls möglich wäre es, einzelne Minima zu erzeugen z.B. durch einfache Bohrungen in der Oberfläche oder Erhebungen ohne Plateau. Die gewählte komplexere Form erlaubt mehr Möglichkeiten zur Beeinflussung des resultierenden Signals z.B. durch Veränderung der Kanten oder der Breite des Plateaus. Somit wird möglicherweise eine Kodierung der Motorstellung mit nur einem Messsystem möglich.

Im Gegensatz zur Skizze hat der reale Tastkopf natürlich einen gewissen Öffnungswinkel des Lichtstrahls, sodass es sich eher um einen Lichtkegel handelt. Dessen Breite auf der Oberfläche hängt vom Abstand des Tastkopfes von der Oberfläche ab. Der re-

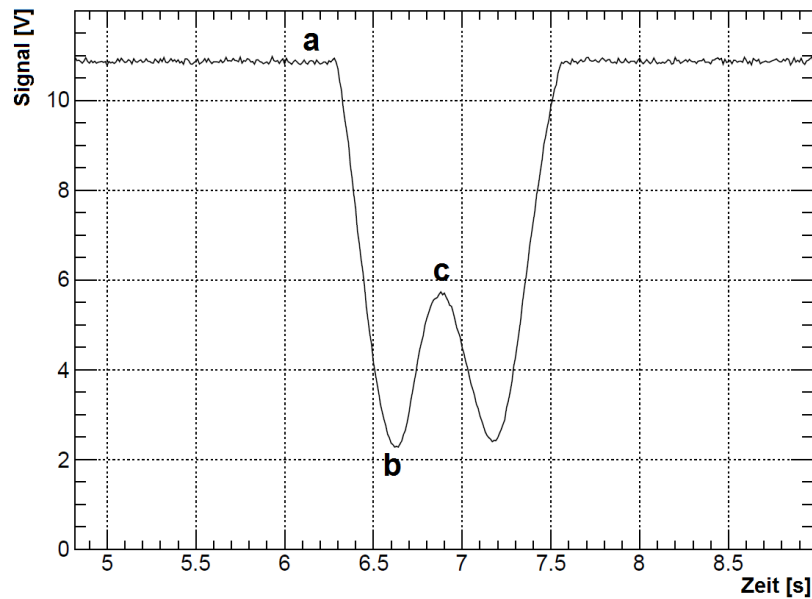


Abb. 3.2: Signalverlauf bei der in 3.1 gezeigten Situation.

relative Unterschied zwischen Breite des Lichtkegels und der Geometrie der Oberfläche beeinflusst das zu erwartende Signal. Ist das Plateau breiter als der Lichtkegel, so wäre kein lokales Maximum, sondern eine vollständige Sättigung zwischen den Minima zu beobachten. Ebenso wäre im Falle eines zu schmalen Plateaus davon auszugehen, dass sich die Minima überlagern und gar kein Maximum mehr zu beobachten ist. Es ist daher notwendig, eine angepasste Oberflächengeometrie zu wählen.

Es wurde eine neue Logikplatte für den mechanischen Aufbau entworfen, welche verschiedene Geometrien zur Verfügung stellt. Die entsprechende Platte ist in Abb. 3.3 dargestellt.

Durch die verschiedenen Plateaubreiten sollten die verschiedenen Signalstrukturen mit bzw. ohne lokales Maximum beobachtbar sein. Ferner sollte durch Variationen der Geometrien und deren Kanten die Form der Signale variiert werden können. So ist z.B. durch eine insgesamt breitere Geometrie eine höhere Halbwertsbreite zu erwarten. Dies kann möglicherweise verwendet werden, um weitere Informationen im Signal zu kodieren, sofern dies die erreichbare Ortsauflösung nicht zu sehr beeinträchtigt. Hierauf wird in Abschnitt 3.6 noch weiter eingegangen.

## 3.2 Experimenteller Aufbau

Zum Untersuchen des Tastkopfes unter realen Verhältnissen wird das Messsystem in den zuvor entwickelten mechanischen Aufbau eingebaut. Anstelle der mechanischen Schalter kommt eine Halterung zur Montage der Faseroptik zum Einsatz. Die Logikplatte wird durch die bereits in Abb. 3.3 gezeigte ersetzt. Um die Komplexität

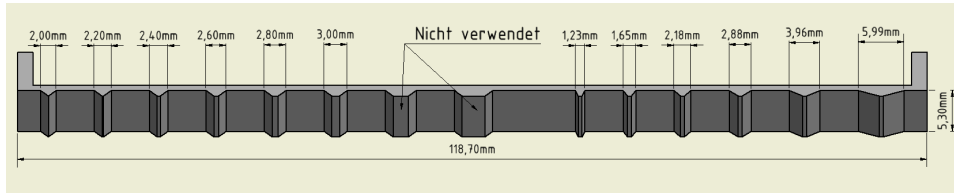


Abb. 3.3: Logikplatte für lichtbasierten Positionssensor. Jeweils eine Hälfte der Platte kann vom Lesekopf gelesen werden. Die Platte kann in zwei Richtungen eingebaut werden, je nach Ausrichtung sind Geometrien mit verschiedenen Winkeln der Kanten oder verschiedene Breiten der Plateaus vor dem Sensor wählbar.

bezüglich der Verkabelung in Grenzen zu halten, wird auf die Montage der vorderen Targetmotoren verzichtet.

Gemessen werden soll das Signal des Lichttasters, bei gleichzeitiger Messung der Schlittenposition über das Referenzsystem des laserbasierten Positionssensors. Da der Positionssensor eine bekannte Genauigkeit von  $5\ \mu\text{m}$  besitzt [Tie17], kann die Genauigkeit des Lichttaster-Systems ermittelt werden. Hierzu wird im Folgenden der Zeitpunkt des lokalen Maximums im Lichttaster-Signal ermittelt und dieser mit dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Positionswert verglichen. Dazu wird eine Auslesung des Lichttaster-Signals, bei gleichzeitiger Aufnahme der Positionsdaten mit ausreichend hoher Abtastrate benötigt.

Gesteuert wird die Messung durch EPICS<sup>1</sup> von einem BeagleBone Black (siehe Abschnitt 3.2.1). Die verwendete Steuersoftware, ein in SNL<sup>2</sup> geschriebener EPICS-Sequencer, wurde von Michael Bölting zur Verfügung gestellt. Diese gibt dem Motor die notwendigen Steuerbefehle und lässt den Motor jeweils in eine Richtung fahren, bis ein voreingestellter Positionswert überschritten wird. Die Bewegungsrichtung wird dann umgekehrt.

Die Elektronik des Messaufbaus wird in Abb. 3.4 durch ein Flussdiagramm veranschaulicht.

Der Laborcomputer dient der Datenaufnahme und als GUI<sup>3</sup> für die Messungen. Die eigentliche Steuerung läuft in einem lokalen Subnetz auf dem BeagleBone. Die Steuerelektronik des Piezomotors ist über einen USB-Hub am BeagleBone angeschlossen. Weitere Details zur Steuerung der PMD101 seitens EPICS finden sich in der Diplomarbeit von Michael Bölting [Boe17].

Eine direkte Auswertung des Laserpositionssensors durch das BeagleBone ist nicht unmittelbar realisierbar, da weder Software noch eine Anschlussmöglichkeit zur Verfügung steht. Es wurde das bereits in früheren Messungen verwendete Galil-Board weiter verwendet. Da durch die Firma Galil eine EPICS Implementierung zur Verfügung gestellt wurde, ist es jedoch möglich, diese auf dem Laborrechner zu betreiben

<sup>1</sup>PANDA DCS System

<sup>2</sup>State Notation Language

<sup>3</sup>Graphical User Interface

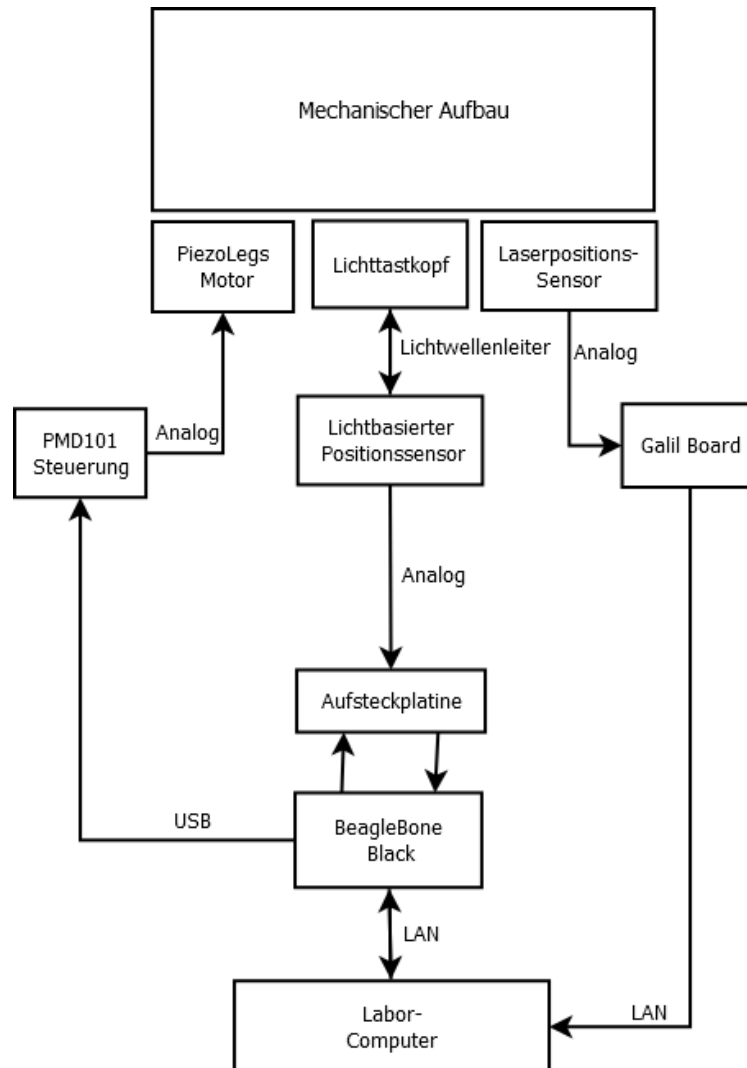


Abb. 3.4: Flussdiagramm des Messaufbaus zum faseroptischen Lichtpositionssensor. Die drei verschiedenen elektronischen Komponenten des Aufbaus sind gezeigt. Primär gesteuert wird der Aufbau über EPICS von einem BeagleBone Black. Über USB wird die Steuerelektronik des Piezomotors angesteuert. Der Lichttaster wird direkt über die internen ADCs eingelesen. Der Laserpositionssensor wird vom Galil-Board ausgewertet und mittels einer separaten EPICS-Umgebung auf dem Labor-Computer zum BeagleBone weitergeleitet.

und auf diese Weise über Netzwerk (LAN) die Positionsdaten am BeagleBone zur Verfügung zu stellen. Unabhängig hierzu misst das BeagleBone mittels interner ADCs den Signalpegel der Lichttaster. Beide Messwerte werden protokolliert und gespeichert.

Diese Lösung ist ohne großen Aufwand zu realisieren, hat allerdings einige Nachteile:

- Aufgrund der Verwendung von EPICS sind die erreichbaren Abtastraten der ADCs bzw. des laserbasierten Positionssensors begrenzt. Die Obergrenze erweist sich hier als 100 Hz, da bei höheren Frequenzen die Galil-Software abstürzt. Zudem ist generell fraglich, in wie weit EPICS intern mit höheren Frequenzen umgehen kann, da bereits für 100 Hz die EPICS Einstellungen umprogrammiert werden mussten. Es wurde daher darauf verzichtet, wenigstens die ADCs mit höheren Raten abzutasten, um Probleme mit EPICS zu vermeiden.
- Ein weiteres Problem stellt die Verwendung von zwei getrennten Computern zur Messung von korrelierten Größen dar. Der erste naive Versuch der Messung, mit Korrelation der Messdaten über die Zeitstempel, führte zur unbrauchbaren Daten, da mit fortschreitender Messdauer eine Verschiebung der Positionsdaten relativ zu denen des Lichtsignals zu beobachten war. Da die Systeme keine synchronisierten Systemuhren haben, ist die Verschiebung auf unterschiedlich schnell laufende Uhren zurückzuführen.

Als Abhilfe wurde die Methode der Datenauslese derart abgeändert, dass EPICS intern im Falle eines Updates der ADC Werte, ein Update der Positionsdaten anstößt. Auf diese Weise wird nur die Uhr der ADCs benötigt, jedoch werden die Positionsdaten immer mit einer gewissen Verzögerung abgespeichert. Leider ist diese auch nicht vollständig konstant, da die Positionsdaten über LAN übertragen werden. Es ist davon auszugehen, dass je nach Dauer der Paketübertragung bzw. der Bearbeitungszeit der Systeme die Positionsdaten mit einem gewissen Zeitjitter versehen sind, aufgrund der hohen Taktraten der verwendeten Computersysteme (MHz), sollte der Jitter jedoch um Größenordnungen unter der Zeitverschiebung durch die Speichervorgänge liegen.

Hinzu kommt, dass die vom mechanischen Aufbau verwendete Führungsschiene vor Beginn der Messungen einen Lagerschaden entwickelt hat. Dies passiert, wenn der Schlitten über das Ende der Führungsschiene hinaus fährt. Bedingt durch den geringen Abstand zwischen Schlittenbasis und Führungsschiene mussten die Stopper an den Enden entfernt werden, wodurch der Motor bei ungünstigen Fahrbefehlen über den Rand der Schiene hinausfahren konnte. Hierbei waren Kugeln aus dem Kugellager des Schlittens herausgefallen. Ein Austausch des Schlittens war aus zeitlichen Gründen nicht mehr möglich, daher wurden so viele Lagerkugeln wie möglich gereinigt und in das Lager zurückgefüllt. Eine entsprechende Verschlechterung der Lauffähigkeit war manuell ohne Last nicht festzustellen. Im Betrieb durch einen Piezomotor, mit der entsprechend geringen Kraft des Motors, ist hier eine negative Beeinflussung des Laufs aber möglich.



Für die folgenden Messung muss zudem bereits der Ersatzmotor verwendet werden, da bei Testmessungen der erste Motor mehrere Kilometer Laufleistung gesammelt und in der Folge einen Lagerschaden entwickelt hatte.

### 3.2.1 Verwendete Hardware

Neben dem bereits im vorherigen Kapitel beschriebenen mechanischen Aufbau werden für die folgenden Messungen entsprechende Auslese- und Steuerkomponenten benötigt. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt. Weiterhin verwendet wird der bereits in Abschnitt 2.3.2 erwähnte Laserpositionssensor als Referenzsystem zur Positionierung.

#### Lichttaster

Herzstück der Messung ist der faseroptische Lichttaster IRS-U-2LA mit dem Tastkopf SK-1000-1-T der Firma Tippkemper aus Deutschland. In Abbildung 3.5 ist der verwendete Sensor vor seinem Einbau zu sehen.

Dieses System, welches eigentlich für den Einsatz in Hochdruck oder sehr verschmutzten Bereichen entwickelt wurde, verwendet einen Glasfaserleiter um ein Infrarotsignal mit 880 nm zum Bestimmungsort zu lenken. Durch denselben Leiter wird auch eine mögliche Reflexion des Signals zurückgeleitet. Hierzu ist der Leiter, wie in Abbildung 3.6 dargestellt, in zwei Bereiche geteilt. Je nach Ausführung können entweder jeweils eine ganze Hälfte des Glasfaserbündels für eine Richtung verwendet werden oder aber auch die Glasfasern per Hand statistisch gemischt sein. Unabhängig von der Ausführung ist das aktive Ende des Leiters mit einer polierten Optik versehen, welche auf das Glasfaserbündel aufgeklebt ist. Der optische Öffnungswinkel des Lichtwellenleiters mit Optik beträgt hierbei ungefähr  $65^\circ$ .

Die Ausgabe des Lesekopfes erfolgt über ein analoges Spannungssignal und kann mittels ADC direkt ausgelesen werden. Nach Rücksprache mit der Entwicklungsabteilung der Firma ist auch eine Verwendung im Vakuum denkbar. Hierzu kann seitens der Firma eine Spezialanfertigung auf Basis von vakuumfesten Glasfasern produziert werden. Die Tastköpfe können mit bis zu 15 m langen Glasfaserleitern betrieben werden, eine Änderung an den elektrischen Komponenten ist aufgrund deren Platzierung außerhalb des Vakuums nicht notwendig.

Für die Anwendung im PANDA-Detektor bedeutet dies, dass lediglich die Glasfaserleiter aus dem Detektor geführt werden müssen. Da keine elektrischen Komponenten in der Nähe der strahlenden Bereiche oder des Magnetfeldes platziert werden müssen, sondern sicher im abgeschirmten Technikraum untergebracht werden können, wäre ein hierauf basierendes System problemlos anwendbar. Vorteilhaft ist insbesondere auch, dass bei einem Sensorausfall dieser im laufenden Betrieb getauscht werden kann.

Bei dem für diese ersten Messungen verwendeten Tastkopf handelt es sich um ein Basismodell ohne besondere Eigenschaften. Der Lesekopf hat einen Durchmesser von 2 mm und ist ohne statistische Mischung ausgeführt. Ein statistisch gemischter



Abb. 3.5: Faseroptischer Lichttaser URS-U-2LA der Firma Tippkemper. Im Bild links hinten zu sehen ist der aktive Teil mit LED und Photodiode. Gut zu sehen ist das schwarz abgeklebte Fenster der Photodiode. Dieses dient zur Absorption von nicht-infrarotem Licht, zwecks Rauschunterdrückung. Auf der rechten Seite ist der Anschluss des Lichtwellenleiters zu sehen, im Vordergrund der hierzu gehörige Tastkopf mit 1 mm Radius. Der Lichtwellenleiter selbst ist im Bild größtenteils nicht zu sehen.

Lesekopf in dieser Größe müsste speziell gefertigt werden, was mit langen Lieferzeiten und höheren Kosten verbunden wäre. Für eine Überprüfung des Grundprinzips wurde daher vorerst die einfache Variante gewählt.

### BeagleBone Black

Als eine einfache Lösung zur Steuerung und grundlegenden Datenauslese wurde der Einplatinencomputer BeagleBone Black gewählt.

Das BeagleBone Black wird mit einem ARM Cortex-A8-Prozessor geliefert, welcher eine Vielzahl frei verwendbarer GPIOs<sup>4</sup> und ADCs bereitstellt. Eine Anbindung an bestehende Netzwerke ist über Ethernet und USB möglich. In Abbildung 3.7 ist das verwendete Board abgebildet

<sup>4</sup>General-Purpose Input/Output

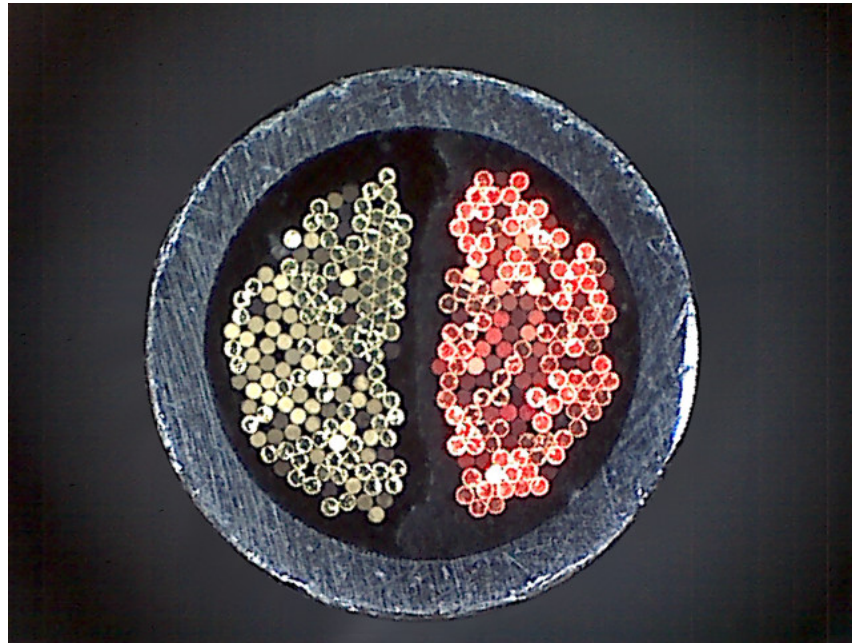


Abb. 3.6: Mikroskopaufnahme des Tastkopfes. Zu sehen ist die Unterteilung des Lichtwellenleiters in zwei getrennte Bündel. Für die Erzeugung des Bildes wurden beide Bündel mit weißem Licht beleuchtet und zusätzlich das rechte mit einem roten Laser bestrahlt. Der Durchmesser des dargestellten Tastkopfes ist 2 mm.

Als Betriebssystem des Boards wird Debian 8.4 mit Kernel 4.1.8-ti-r18 (Image vom 2015-09-27) von Beagleboard.org verwendet. Für das BeagleBone Black existiert ferner eine fertig verwendbare EPICS-Software-Umgebung, dies ermöglicht eine einfache Einrichtung und somit das Erstellen einer erste EPICS-Integration der Hardware.

Im Einzelnen verwendet wird:

- asyn-dev 4.28-1+deb8u1
- devgpio 1.0.4-1+deb8u1
- epics-dev 3.14.12.5-4+deb8u2
- seq-dev 2.2.3-3+deb8u1
- stream-dev 2.6c-1+deb8u1

Inbesondere die ADCs des BeagleBones werden in den folgenden Messungen eine Rolle spielen, da diese verwendet werden, um die Signalpegel der Lichttaster auszu-lesen. Bis zum vollständigen Entwicklung des strahlenharten FAIR-DCS-Board, wird das BeagleBone Black eine kostengünstige Testumgebung zur Verfügung stellen.

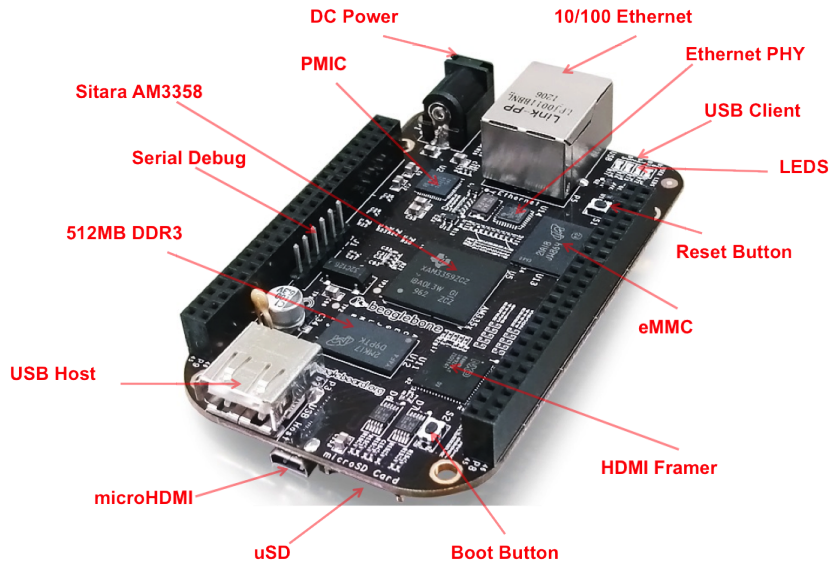


Abb. 3.7: Der BeagleBone Black Einplatinencomputer, die seitlichen Steckleisten enthalten die GPIOs und ADCs [Fou].

### Aufsteckplatine zur Kontaktierung der ADCs

Ein Problem war, die Lichttaster von Tippkemper am BeagleBone Black ordentlich anzuschließen. Die Lichttaster werden mit einer Versorgungsspannung von 24 V betrieben und geben ein Ausgangssignal von bis zu 10,8 V aus. Die ADCs des BeagleBone sind jedoch nur bis zu einer Spannung von 1,8 V zu betreiben. Es ist daher nötig einen Spannungsteiler vorzuschalten. Ferner hat jeder Lichttaster, bedingt durch Massekabel, Stromversorgung und Ausgang insgesamt fünf anzuschließende Kabel. Da potentiell mehrere Taster gleichzeitig anzuschließen sind, musste hier eine Lösung gefunden werden, um eine ordentliche, gegen Kurzschlüsse geschützte Verkabelung sicherzustellen. Dazu wurde eine eigene Platine entwickelt, welche mittels Molex-Steckern einen sicheren Anschluss der Lichttaster an das Board ermöglicht.

Die Versorgungsspannung des Boards wird über eine Steckverbindung durch ein Labornetzteil geliefert und die Ausgangsspannungen der Taster mit Spannungsteilern (Potentiometern) auf den gewünschten Bereich reduziert. Im Anhang C sind Schaltplan und Belegungsplan des Boards dargestellt.

Das Board wurde von der Elektronikwerkstatt des Institut für Kernphysik gefräst. Die Bestückung und das Verlöten erfolgten manuell. Das fertige Board ist in Abbildung 3.8 zu sehen.

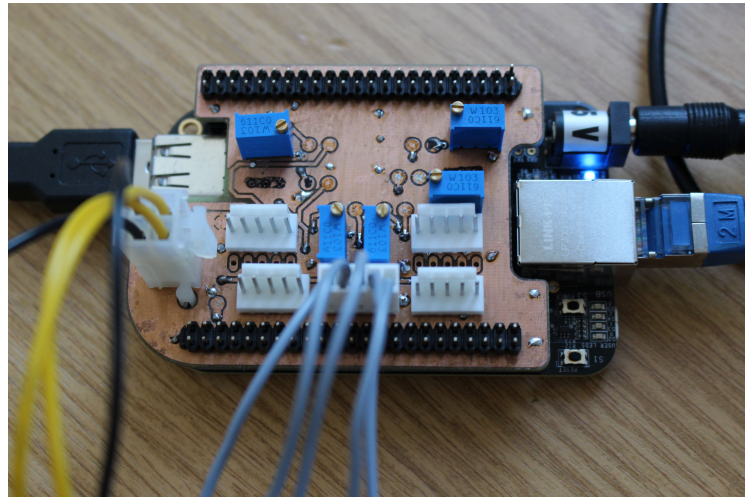


Abb. 3.8: BeagleBone Black mit aufgesteckter Platine zur Kontaktierung der Lichttaster

## 3.3 Vorbereitende Untersuchungen des Messaufbaus

Bevor die eigentlichen Messungen zur Ortsauflösung des Lichttasters starten können, muss dieser am Aufbau montiert werden. Hierzu muss eine geeignete Position und Lage gefunden werden. Des Weiteren wird eine geeignete Einstellung des Antriebsmotors gesucht. Zudem ist eine nähere Untersuchung der angefertigten Logikplatte, mit Vergleich von Ist- und Sollwerten der Geometrien erforderlich, um spätere Messergebnisse mit den realen Oberflächeneigenschaften vergleichen zu können.

### 3.3.1 Untersuchung der Logikplatte

Bevor Messungen mit dem Lichttaster durchgeführt werden, wird die Logikplatte mit einem USB-Mikroskop untersucht. Dabei sollen die einzelnen Geometrien vermessen und mit den geplanten Werten verglichen werden. Auch kann so ein erster Eindruck über die Qualität der Oberfläche gewonnen werden. In Abbildung 3.9 sind Aufnahmen der Oberfläche unter zwei verschiedenen Winkeln zu sehen.

Die Logikplatte wurde von der feinmechanische Werkstatt des Instituts für Kernphysik aus Aluminium mittels CNC-Fräsen gefertigt. Die Spuren dieser Fertigungsmethode sind in den Abbildungen deutlich zu erkennen. Der Fräskopf hat hier kreisförmige Riefen auf der Oberfläche hinterlassen.

In der Diskussion des Messprinzips war bisher von einem ideal reflektierenden Medium ausgegangen worden. Das verwendete Aluminium reflektiert das Infrarotlicht des Tastkopfes zufriedenstellend. Als Test wurde der Tastkopf vor die Aluminiumoberfläche gehalten und die Veränderung des Ausgangssignal betrachtet.

Die Riefen in der Oberfläche führen zu einer ungleichmäßigen Reflexion, deren Einfluss überall auf der Logikplatte im Mittel gleich sein sollte. Dies führt zu einem Offset

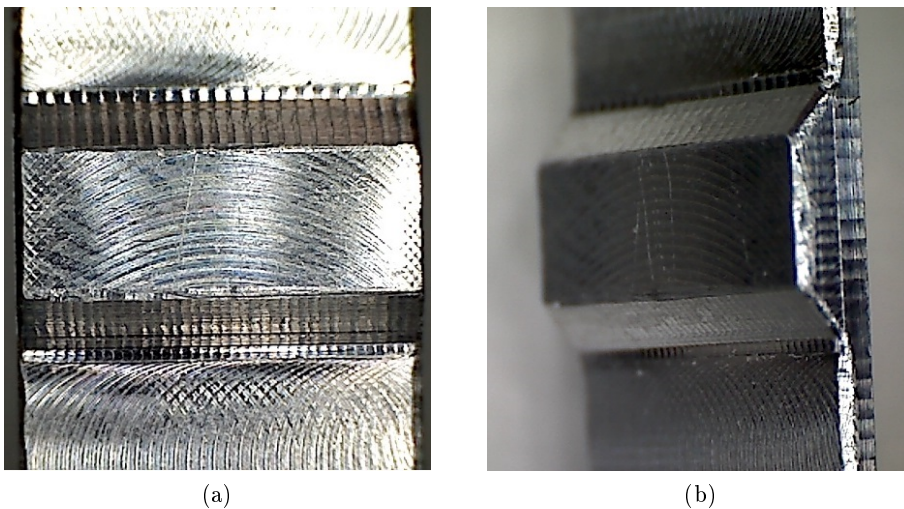


Abb. 3.9: Mikroskopische Aufnahmen der Oberfläche der optischen Logikplatte. Gezeigt ist dieselbe Geometrie unter zwei verschiedenen Winkeln. Deutlich sichtbar sind die Spuren des CNC-FräSENS, in Form von gleichmäßigen, runden Riefen. Ebenfalls zu sehen ist der nicht optimale Übergang von planer Fläche auf Steigung der Geometrien. Beim FräSEN sind hier Stufen entstanden, die bei allen Geometrien zu beobachten sind.

im Signal und in Kombination mit der bei Metallen immer auftretenden diffusen Reflexion zu einem jederzeit beobachtbaren Signalanteil. Somit ist nicht zu erwarten, dass das Signal an den Geometrieflanken vollständig verschwindet.

Idealerweise sollte auf Dauer eine polierte Oberfläche verwendet werden. Für einen ersten konzeptionellen Beweis wurde aus Zeitgründen hierauf verzichtet.

#### Dimensionen der Geometrien

Ebenfalls untersucht werden die Dimensionen der gefertigten Geometrien. Die Fertigung mittels CNC-FräSEN unterliegt gewissen Fertigungstoleranzen. Da spätere Messungen die Dimensionen der Geometrien als Vergleich benötigen, ist es notwendig möglichst genaue Werte zu ermitteln.

Exemplarisch für eine derartige Untersuchung ist in Abbildung 3.10 das Verfahren dargestellt. Die seitlich liegende Logikplatte wurde zusammen mit einem Maßstab als Referenz - mit einem Mikroskop fotografiert. Mittels Pixelzählung können dann Längen berechnet werden. Da Maßstab und Oberseite der Logikplatte nicht exakt auf gleicher Höhe lagen, enthält dies einen systematischen Messfehler aufgrund der Perspektive. Dieser Fehler sollte jedoch klein sein im Vergleich zu der Schwierigkeit, Kanten in den Fotografien exakt zu erkennen. So ist z.B. der im Bild rechts zu sehende schwarze Streifen nicht die Kante, sondern tatsächlich die Unterseite der leicht schräg

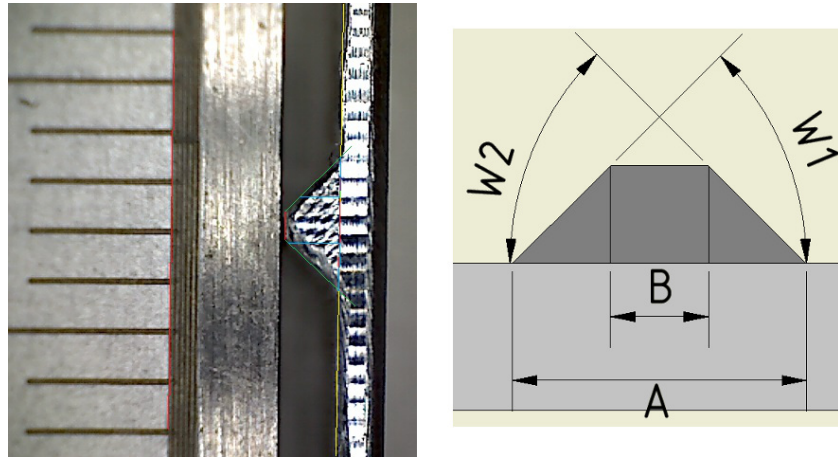


Abb. 3.10: Vermessung der Geometriedimensionen. Die Logikplatte steht seitlich aufrecht, neben ihr wurde eine Maßstab platziert. Die Abstandsmessung erfolgt über Pixelzählung. Zur Kalibrierung wird zuerst die Anzahl der Pixeln am Maßstab gezählt, anschließend können die Kanten der Geometrie ausgezählt und umgerechnet werden.

liegenden Logikplatte. Aufgrund der fehlenden seitlichen Beleuchtung wirkt diese als Schatten.

Beim Erstellen der Bilder wurde die Logikplatte mehrmals leicht verkippt, um ein Gefühl für die vorliegenden Kanten zu entwickeln, bevor ein Foto gemacht wurde. Dennoch muss bei jeder Kante tendenziell von einem Fehler von  $\pm 3$  px ausgegangen werden. Dieser wird entsprechend mit gaußscher Fehlerfortpflanzung berücksichtigt. Neben der Breite des jeweiligen Plateaus sowie der gesamten Geometrie werden so auch die Winkel auf beiden Seiten der Geometrie bestimmt. Die Resultate dieser Messungen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet, für die Bezeichnungen siehe Abb. 3.10 rechts.

Die Logikplatte wurde seitens der Werkstatt ohne spezielle Fertigungstoleranzen gefräst. Entsprechend ist es nicht weiter überraschend, dass die resultierenden Geometrien entsprechende Abweichungen aufweisen. Insbesondere bei Vorgaben mit einem Plateau von 0 mm Breite war es nicht zu erwarten, dass dies praktisch gefertigt werden kann. Die erreichten Werte von  $\pm 0,3$  mm und bei Winkeln im Bereich von  $\pm 9^\circ$  zu den Sollwerten sind aber für einen ersten Prototypen akzeptabel. Spätere Logikplatten für einen praktischen Einsatz würden mit entsprechend höheren Anforderungen an die Toleranz gefertigt werden. Zu diesem Zeitpunkt bestehen jedoch noch keine Erfahrungswerte zur optimalen Geometrie, daher sind die vorhandenen Dimensionen vollkommen ausreichend.

| #  | A [mm] | B [mm] | W1/2 [°] | a [mm]    | b [mm]    | w1 [°]     | w2 [°]     |
|----|--------|--------|----------|-----------|-----------|------------|------------|
| 5  | 2,00   | 0,00   | 45       | 1,84±0,08 |           | 45,0±2,5   | 49,0±2,6   |
| 4  | 2,20   | 0,20   | 45       | 2,05±0,08 | 0,19±0,06 | 45,0±3,0   | 45,8±3,0   |
| 3  | 2,40   | 0,40   | 45       | 2,16±0,08 | 0,25±0,06 | 49,5±3,4   | 45,7±3,1   |
| 2  | 2,60   | 0,60   | 45       | 2,54±0,09 | 0,40±0,06 | 45,7±2,6   | 44,3±2,6   |
| 1  | 2,80   | 0,80   | 45       | 2,69±0,09 | 0,57±0,06 | 44,3±2,4   | 47,2±2,20  |
| 0  | 3,00   | 1,00   | 45       | 2,81±0,09 | 0,76±0,06 | 47,0±2,5   | 45,6±2,4   |
|    | 4,00   | 2,00   | 45       | 4,00±0,10 | 1,86±0,06 | 44,4±2,3   | 46,9±2,2   |
|    | 5,00   | 3,00   | 45       | 4,95±0,11 | 2,76±0,07 | 46,0±1,8   | 45,0±1,8   |
| 6  | 5,99   | 0,50   | 20       | 6,32±0,13 | 0,68±0,06 | 19,92±0,84 | 21,73±0,84 |
| 7  | 3,96   | 0,50   | 30       | 3,60±0,10 |           | 32,07±1,51 | 29,45±1,50 |
| 8  | 2,88   | 0,50   | 40       | 2,75±0,09 | 0,25±0,06 | 40,68±1,89 | 40,68±1,89 |
| 9  | 2,18   | 0,50   | 50       | 2,14±0,08 | 0,30±0,06 | 46,97±2,40 | 48,53±2,44 |
| 10 | 1,65   | 0,50   | 60       | 1,74±0,08 | 0,42±0,06 | 56,93±3,06 | 51,95±2,94 |
| 11 | 1,23   | 0,50   | 70       | 1,46±0,08 | 0,54±0,06 | 65,22±2,85 | 62,99±2,90 |

Tab. 3.1: Gemessene Dimensionen der Oberflächengeometrien der Logikplatte. Großbuchstaben entsprechen den Soll-Werten, die laut CAD-Modell gefordert waren. Kleinbuchstaben bezeichnen die entsprechenden Messwerte. Zwei Plateaubreiten konnten nicht bestimmt werden, da das Plateau nicht erkennbar war. Die zu Grunde liegenden Aufnahmen finden sich im Anhang A.3. Nummeriert sind die später in Messungen verwendeten Geometrien.

### 3.3.2 Kalibrierung des Tastkopfes

Da der mechanische Aufbau für den Einsatz mit mechanischen Schaltern entwickelt wurde, war keine Möglichkeit zum Einbau der Lichttaster vorgesehen. Da diese jedoch ähnliche Dimensionen haben, können sie in derselben Position wie zuvor die Schalter installiert werden. Die Positionierung des Tastkopfes unterhalb des Schlittenaufbaus ist, durch den vorhandenen Platz und die Notwendigkeit einen möglichst großen Bereich der Logikplatte abfahren zu können, bereits vorgegeben.

Im Gegensatz zu mechanischen Tastern benötigt der lichtbasierte Tastkopf keinen direkten Kontakt mit der Logikplatte und der Abstand zwischen Tastkopf und Oberfläche ist eine freie Variable.

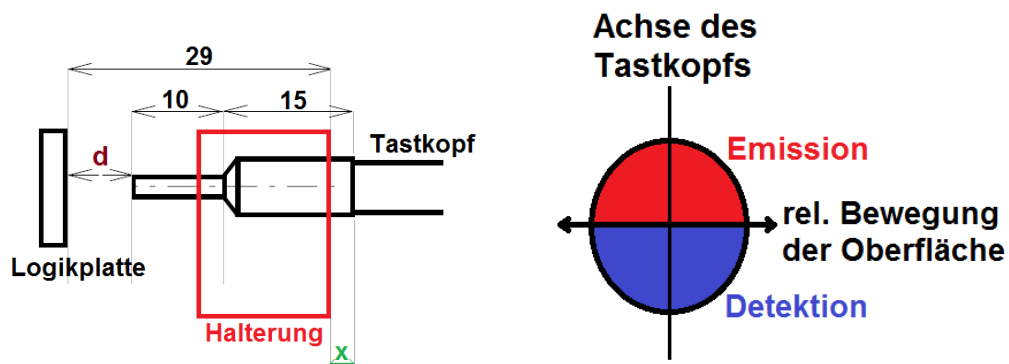
Ebenso kann die Geschwindigkeit des Schlittens bei Messungen variiert werden. Zuerst wird ein geeigneter Abstand des Tastkopfes gesucht sowie der Aufbau bei verschiedenen Geschwindigkeiten getestet.

#### Abstand des Tastkopfes

In der ersten Messung soll daher der Einfluss des Abstandes auf den Signalverlauf festgestellt werden. Hierzu wird der Tisch jeweils in den linken Anschlag (für Bezeichnung „links“ siehe Abbildung 2.14) verschoben und die Logikplatte (Variable Plateau-Längen) abgetastet.



Beim Zusammenbau des Aufbaus fällt auf, dass die Logikplatte nicht plan am Aufbau montiert werden kann. Die Oberfläche ist immer minimal relativ zum Tastkopf verkippt ( $< 5^\circ$  gegen y-Achse). Zudem ist ein senkrechter Einbau des Lichttasters bzw. seiner Halterung nur nach Augenmaß möglich, da die Spitze des Lichttasters nach Einbau unter dem Schlitten nicht mehr für Messungen erreichbar ist. Die Abweichung von einer senkrechten Ausrichtung dürfte ähnlich hoch wie der Fehler bei der Ausrichtung der Oberfläche sein. Da dies derzeit nicht weiter verbessert werden kann, muss ein möglicher Einfluss auf die Messung als systematischer Fehler akzeptiert werden.



(a) Skizze: Seitliche Ansicht des Tastkopfes des Positionssensors mit Halterung (nicht maßstabsgetreu). Angegebene Maße in mm. „x“ entspricht den gemessenen, „d“ den tatsächlichen Abstandswerten.

(b) Skizze: Ausrichtung der Tastkopfachse relativ zur Bewegungsrichtung. Die dargestellte Ausrichtung wird als senkrecht bezeichnet.

Abb. 3.11: Skizzen zum Einbau des Lichttasters

Da der Tastkopf vollständig unter dem verschiebbaren Tisch verbaut ist, ist auch eine Messung des Abstandes Tastkopf zur Oberfläche der Logikplatte nicht direkt möglich. Daher wird, bevor der Schlitten vollständig montiert ist, die Halterung des Tastkopfes fest montiert und anschließend der Abstand zwischen Hinterkante der Halterung zur Oberfläche der Logikplatte gemessen. Da die Länge des Tastkopfes bekannt ist, kann der Abstand Hinterkante der Halterung zur Hinterkante des Tastkopfes für die Abstandsbestimmung verwendet werden. Zur Messung wird eine Schublehre verwendet. Die gemessenen Werte sind zur Verdeutlichung in Abb. 3.11a illustriert.

Der Abstand zwischen Halterung und Oberfläche ist während Messungen nicht völlig konstant, da durch eine nicht vollständig parallele Ausrichtung von Schiene und Tastkopfachse der Abstand je nach Schlittenposition variieren kann. Auch ist die Halterung nicht zwangsläufig bei jeder Neumontage wieder exakt gleich verschraubt.

Es ist von einem entsprechenden Fehler auszugehen, der hier auf eine Größenordnung  $\pm 1$  mm abgeschätzt wird.

Zusammengefasst kann der tatsächliche Abstand des Tastkopfes über

$$d = 4 \text{ mm} + x$$

ermittelt werden. Als Genauigkeit kann lediglich ungefähr  $\pm 1$  mm abgeschätzt werden.

Da ein in zwei Sektoren geteilten Tastkopf verwendet wird, muss darauf geachtet werden, diesen in allen Messungen einheitlich auszurichten. Für die folgenden Messungen wird dieser senkrecht zur Bewegungsachse montiert (siehe Abb. 3.11b). Gemessen wird in 1 mm Schritten x-Werte von 0 mm bis 6 mm.

Das Ergebnis für  $d = 6$  mm ist in Abbildung 3.12a dargestellt. Auf der x-Achse ist die relative Position des Laserpositionssensors aufgetragen. Dessen Nullpunkt wird durch den Startpunkt der Messung festgelegt. Dieser lag am äußeren Rand der Logikplatte und wurde im Verlauf dieser Messung nicht verändert, so dass die relativen Werte miteinander vergleichbar sind.

Der theoretisch erwartete Effekt, dass das lokale Maximum durch die Minima überlagert wird bzw. ganz in Sättigung geht ist deutlich zu erkennen. Die gewünschte Struktur aus zwei Minima mit dazwischen liegendem lokalem Maximum, ist an zwei verschiedenen Geometrien zu beobachten. Öffnungswinkel des Tastkopfes und Abstand zur Oberfläche sind während jeder einzelnen Messung konstant, folglich ist es auch die Breite des Lichtkegels auf der Oberfläche. Es variiert somit der relative Unterschied zwischen Strahl- und Oberflächengeometrie.

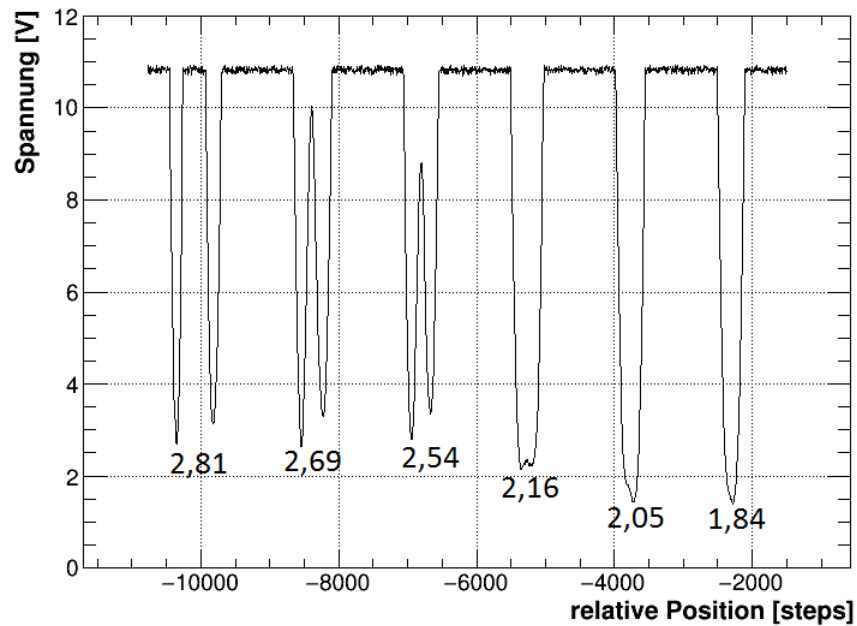
Zum Vergleich ist in Abbildung 3.12b die Messung mit  $d = 4$  mm dargestellt. Bei konstantem Öffnungswinkel bedeutet der geringere Abstand eine kleinere Strahlbreite auf der Oberfläche. Da die Strahlbreite kleiner wird, passt der Strahl auch bei kleineren Geometrien komplett auf ein Plateau. Erwartungsgemäß verschieben sich die lokalen Maxima daher in Richtung Sättigung, während bei jenen, die zuvor durch zwei überlagerte Minima geprägt waren, sich nun ein lokales Maximum auszuprägen beginnt.

Folglich ist die Form des Signals abhängig von einer Kombination aus Plateaubreite und Abstand des Tastkopfes.

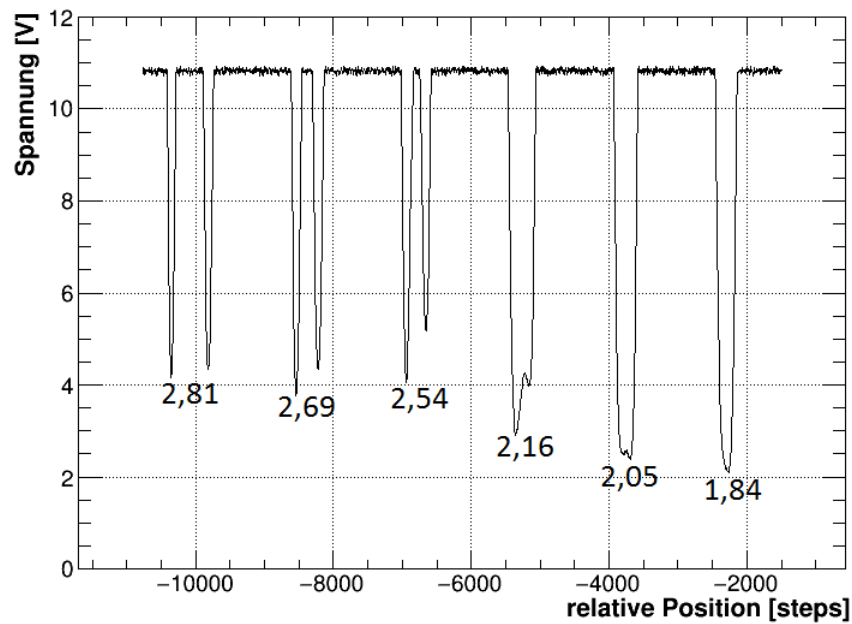
Die vollständigen Graphen der weiteren Messungen finden sich im Anhang A.2. Zum direkten Vergleich zeigt Abb. 3.13 alle aufgenommenen Kurven für eine Geometrie.

Den aufgenommenen Kurven nach ist somit ab  $d = 8$  mm der Tastkopf, außerhalb der Oberflächengeometrien, nicht mehr länger in Sättigung. Tatsächlich sind bereits bei der Messung mit  $d = 7$  mm erstmals einzelne Verluste der Signalthöhe, im Vergleich mit der Sättigung auszumachen. Es ist daher festzuhalten, dass der Tastkopf mit maximal  $d \approx 6,5$  mm Abstand eingebaut werden sollte. Sonst sollte der Abstand derart gewählt sein, dass die beobachtbaren Signalformen bestmöglich auswertbar sind.

Ferner ist zu beachten, dass der Abstand des Tastkopfes möglicherweise auch einen Einfluss auf die erreichbare Ortsauflösung des Sensors haben könnte. Prinzipiell sind



(a)  $d = 6$  mm



(b)  $d = 4$  mm

Abb. 3.12: Ausgangssignal einer kompletten Schlittenbewegung für zwei verschiedene Abstände  $d$ . Dargestellt ist die Bewegung des Tastkopfes über Geometrien mit verschiedenen Plateaubreiten. Die angegebenen Breiten entsprechend den gemessenen Werte in mm (siehe Tabelle 3.1).

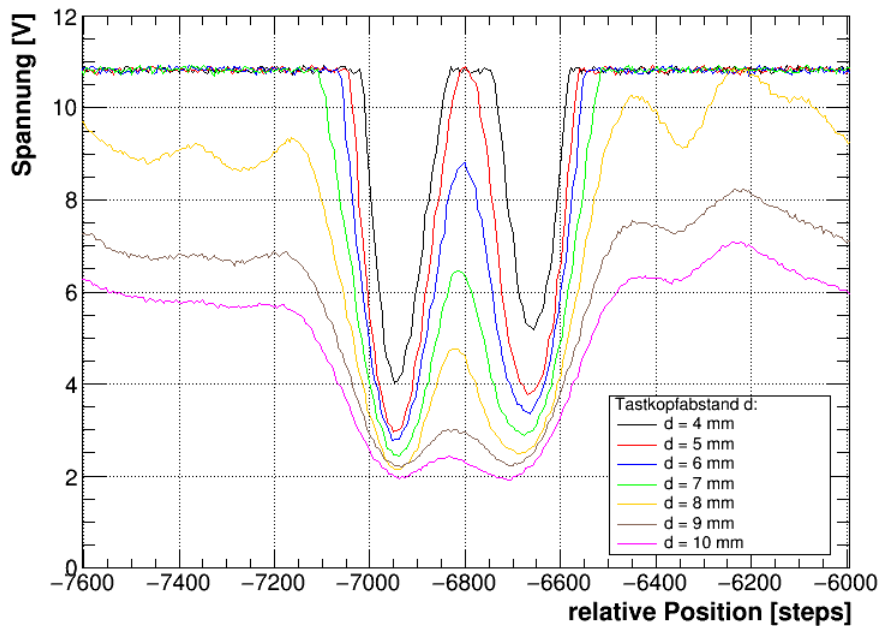


Abb. 3.13: Darstellung der Signalformen für Geometrie # 2 für verschiedene Abstände des Tastkopfes. Wird der Tastkopf zu weit von der Oberfläche entfernt, so kommt der Sensor nicht mehr in Sättigung. Zu geringe Abstände führen zu einer Verbreiterung des lokalen Maximums.

kleine Strahlkegel vermutlich für eine hohe Ortsauflösung besser geeignet, daher sollte nach Möglichkeit kein zu großer Abstand gewählt werden.

### Geschwindigkeit des Schlittens

Die eingestellte Geschwindigkeit des Piezomotors sollte keinen Einfluss auf die Gestalt eines Signals haben. Ändern wird sich die Anzahl an Datenpunkten die pro Signal aufgenommen werden, bedingt durch die konstante Abtastrate des ADCs. Ebenso werden sich die Anstiegs-, Abfallzeiten und Halbwertsbreiten mit der Geschwindigkeit verändern. Die Zeiten hängen antiproportional von der Geschwindigkeit ab, für deren Messung ist somit eine konstante Geschwindigkeit nötig, um vergleichbare Resultate zu erzielen.

Unabhängig von der Signalaufnahme wären mechanische Probleme am Aufbau bei zu hohen Geschwindigkeiten denkbar. Um ein Gefühl für die Auswirkung der Geschwindigkeit auf die Messungen zu bekommen, wird eine Messreihe mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Hierzu wird der Tisch, wie in der vorherigen Messung, jeweils einmal gefahren. Der Abstand des Lichttasters ist auf  $d = 6,5$  mm eingestellt und die Ausrichtung der Tastkopfzonen wird beibehalten.

Erwartungsgemäß sehen alle aufgenommenen Kurven identisch aus, lediglich die Dauer der Messungen verändern sich. Die aufgenommenen Messkurven finden sich im Anhang A.1. Als ein Kompromiss zwischen ausreichend Daten pro Signal und einer möglichst hohen Rate an Fahrbewegungen pro Zeit werden die folgenden Messungen mit einer Geschwindigkeit zwischen  $300 \text{ steps/s}$  bis  $900 \text{ steps/s}$  durchgeführt werden.

Höhere Geschwindigkeiten würden zwar mehr Signale pro Zeit ergeben, jedoch nur unter entsprechender Abnahme der Auflösung einzelner Strukturen. Zudem würden die mechanischen Belastungen unnötig ansteigen. Niedrigere Geschwindigkeiten dagegen würden zu langen Messdauern führen und die Statistik negativ beeinflussen.

## 3.4 Durchführung der Messungen zur Funktionsüberprüfung

Mit den Vorarbeiten können nun die eigentlichen Messungen durchgeführt werden. Während bei den bisherigen Messungen jeweils nur eine Tischbewegung betrachtet wurde, benötigen die folgenden Messungen ausreichend Statistik (z.B. zur Untersuchung der Ortsauflösung) und es wurden daher jeweils etwa  $\approx 6000$  Schlittenbewegungen ausgeführt. Dies entspricht bei einer Geschwindigkeit von  $600 \text{ steps/s}$  einer Messdauer von 24 h.

Für die Messungen wird die Logikplatte vorerst weiterhin in ihrer ursprünglichen Konfiguration (variable Plateau-Längen) belassen.

### 3.4.1 verschiedenen Tastkopfausrichtungen

Zu Beginn wird eine Messreihe mit verschiedenen Tastkopfausrichtungen durchgeführt. Dazu wird der Tastkopf parallel zur Bewegungsachse des Schlittens montiert (siehe Abb. 3.11b für Definition von parallel). Um die Ausrichtung des Tastkopfes korrekt zu sehen, ist ein Ausbau der Tastkopfhalterung erforderlich. Die beiden Komponenten können separat ausgerichtet und anschließend verbaut werden. Die Ausrichtung des Tastkopfes ist aufgrund des Fehlens einer klaren Achse (die Zonen lassen sich nur durch einseitiges Einstrahlen von Licht in den Lichtwellenleiter sichtbar machen) nicht exakt zu justieren. Die Genauigkeit dürfte bei etwa  $\pm 5^\circ$  liegen.

Nach der Rückmontage der Tastkopfhalterung werden zwei Messungen durchgeführt mit Abstand  $d = 6,2 \pm 1,0 \text{ mm}$ , Geschwindigkeit  $600 \text{ steps/s}$  und einer Dauer von einer Stunde durchgeführt. Nach der ersten Messung wird der Lichtwellenleiter umgekehrt auf den Detektor geschraubt und somit eine  $180^\circ$  Drehung des Tastkopfes bewirkt. Auf eine Messung mit  $90^\circ$  Ausrichtung wird verzichtet, da hierfür ein Ausbau des Tastkopfes nötig ist und dadurch keine Messung mit sonst identischen Parametern (insbesondere Winkel und Abstand des Tastkopfes) möglich wäre.

Anhand der beiden durchgeführten Messungen wird es möglich sein, die Signale bei unterschiedlicher Ausrichtung miteinander zu vergleichen.

### 3.4.2 verschiedenen Geschwindigkeiten

Für die folgenden Messungen wird der Tastkopf in senkrechter Ausrichtung und Abstand von 5 mm inklusive Halterung fest verbaut und anschließend nicht mehr verändert. Somit sollte auch der Winkel, unter dem der Tastkopf relativ zu Oberfläche steht, in den restlichen Messungen konstant sein.

Es werden nun eine Reihe von Messungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Dabei wird die Messdauer mit der Geschwindigkeit skaliert, so dass jede Messung in etwa die gleiche Anzahl von Schlittenbewegungen enthält. Die folgenden Geschwindigkeiten werden so gemessen.

1. 600 steps/s
2. 300 steps/s
3. 900 steps/s

Nach der Messungen mit 900 steps/s musste jedoch aufgrund von Softwareproblemen der laserbasierte Positionssensor neu gestartet werden, wodurch sich die 0-Position verschob. Die sich anschließenden Messungen hätten daher unterschiedliche relative Positionen gehabt und es wurde auf eine Fortsetzung der Messreihe verzichtet.

#### Untersuchung zur Konstanz der Schlittengeschwindigkeit

Bereits anhand der vorangegangenen Messungen wurde bemerkt, dass die Geschwindigkeit des Schlittens nach einer gewissen Zeit, sprunghafte Veränderungen aufweist. Die mittlere Geschwindigkeit bleibt dabei über längere Zeiten konstant und ändert sich plötzlich in einen anderen „Zustand“. Für die Messung mit 600 steps/s ist dies in Abbildung 3.14 dargestellt.

Zwar war durch das beschädigte Lager des Schlittens eine Auswirkung auf die Geschwindigkeiten zu erwarten. Unklar ist jedoch weshalb sich die Geschwindigkeit derart plötzlich ändert. Zudem beträgt der größte zu beobachtende Geschwindigkeitssprung in den Messungen einen Faktor von 2. Eine derart große Veränderung durch sprunghafte Variationen in der Reibung erscheint eher unwahrscheinlich.

Der Vergleich der Messdaten des Lichttasters (siehe Kapitel 3.5.2) mit denen des laserbasierten Positionssensors zeigt, dass beide Systeme die Variationen gleichermaßen registrierten. Dies spricht gegen ein Problem in den einzelnen Sensoren.

Die Geschwindigkeitsverläufe verschiedener Messungen zeigen zudem, ein zeitlich ähnliches Verhalten in alle Messungen. Dies deutet eher auf eine systematisch Ursache.

Ausgeschlossen als Fehlerursache wurde die Steuerelektronik des Piezomotors. Zudem wurde eine minimale Beweglichkeit der Führungsschiene bezüglich der Grundplatte festgestellt, welche durch eine unzureichende Fixierung der Schiene bedingt war. Dies führt zu einer Verschiebung der Schiene während der Messungen und damit, durch Winkeländerungen relativ zum fest eingebauten Motor, zur ungleichmäßigen Lasten. Allerdings waren die sprunghafte Veränderungen auch nach einer besseren Fixierung weiterhin zu beobachten [Boe17]. Gegen eine mechanische Ursache spricht zudem die sprunghafte Natur der Veränderungen, auch hier wären eher kontinuierliche Veränderungen zu erwarten.

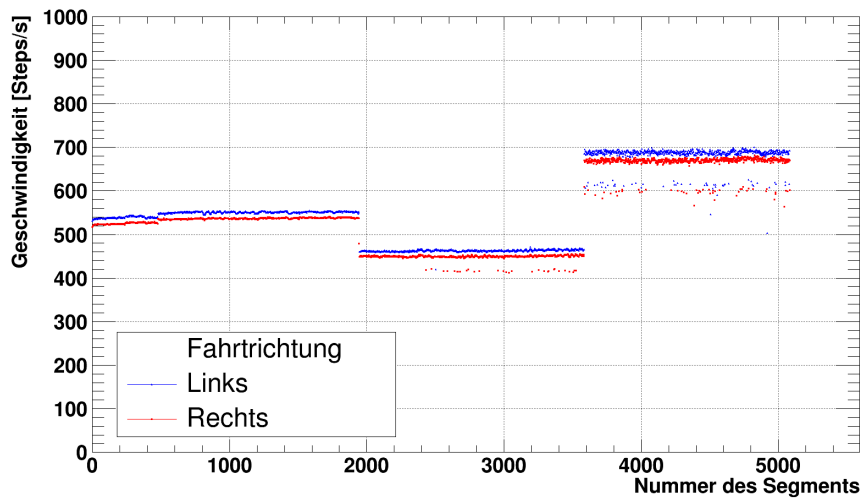


Abb. 3.14: Zeitlicher Verlauf der gemittelten Geschwindigkeit. Ein Segment entspricht einer vollständigen Rechts- bzw. Linksbewegung des Schlittens. Die Geschwindigkeiten werden aus den Positionsdaten bestimmt, indem aus ihrem zeitlichen Verlauf im Bereich einer Geometrie mittels linearen Fit die Steigung bestimmt wird. Für eine Darstellung des Positionsverlauf siehe Abb.3.16. Die dargestellten Geschwindigkeiten entsprechen dem Mittelwert der Geschwindigkeit der verschiedenen Geometrien.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist die Datenaufnahme über das BeagleBone Black. Hier könnten Veränderungen in den Zeitintervallen zu scheinbaren Geschwindigkeitsänderungen führen, dadurch wäre allerdings ebenfalls eher ein statistischer Effekt zu erwarten.

Zusammengefasst kann die genaue Fehlerursache nicht identifiziert werden und weitere Untersuchungen sind erforderlich. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Geschwindigkeitsvariation entsprechend berücksichtigt und soweit möglich, mittels der Momentangeschwindigkeit, die Messdaten korrigiert - unabhängig davon ob es sich hierbei nun um eine tatsächliche Veränderung der Schlittengeschwindigkeit oder einen systematischen Fehler handelt.

#### 3.4.3 alternativer Geometrien

Für die letzte Messung wird die Logikplatte umgebaut, um Messungen an Geometrien mit unterschiedlichen Winkeln zu erlauben.

Jedoch war während der vorherigen Messung ein Lager des Antriebsmotor gebrochen. Vermutlich ist dies auf transversale Belastung des Motors zurückzuführen, welche die Lager des Motors überstrapaziert hat. Dies kann insbesondere passieren, wenn Schiene und Motor nicht exakt parallel stehen, was aufgrund unzureichender Fixie-

rung möglich war. Zudem war der Motor in den vorherigen Messungen bereits eine Strecke von etwa 2,5 km gefahren und im Grenzbereich seiner Lebenserwartung.

Da der Ersatzmotor in der letzten Messreihe beschädigt wurde und kein weiterer Ersatz zur Verfügung steht (für eine Neubeschaffung oder Reparatur verblieb zu wenig Zeit), muss der beschädigte Motor für die abschließende Messung weiter verwendet werden. Die Führungsschiene wird mit anderen Schrauben erneut fixiert, so dass kein Spiel mehr festzustellen ist.

Um den Motor möglichst wenig zu belasten, wird die letzte Messung mit 300 steps/s gemessen. Nach der Neumontage der Schiene muss am Tastkopf die Distanz neu eingestellt werden, um die gewünschten Signalstrukturen zu erhalten. Dabei wird versucht die Ausrichtung konstant zu lassen, als neuer Abstand wird  $d = 4,6 \pm 1,0$  mm eingestellt.

## 3.5 Ortsauflösung des Lichttasters

Die wesentliche Information für die Anwendbarkeit des Lichttaster im Primärtargetaufbau ist die erreichbare Ortsauflösung des Lichttasters. Da das System später zur sicheren Positionierung des Schlittens vor der Strahlrohröffnung dienen soll, ist eine ausreichend hohe Auflösung erforderlich.

Insgesamt sollte der Schlitten später auf 0,5 mm genau positionierbar sein, um einen Kontakt der Targets (Filamente sowie deren Rahmen) mit der Strahlröhre zu vermeiden. Es ist eine entsprechend höhere Auflösung des Sensors erforderlich, um genügend Sicherheitsabstand für die mechanische Umsetzung zu lassen. Als erste, grobe Zielsetzung für die Auflösung wird  $100 \mu\text{m}$  angenommen.

Zur Auswertung der Ortsauflösung werden die in Kapitel 3.4.2 gewonnenen Daten verwendet. Durch die längere Laufzeit ist ausreichend Statistik vorhanden, um die Auflösung zu bestimmen. Der Lichttaster war auf die Region der Logikplatte mit verschiedenen breiten Plateaus ausgerichtet. Im Folgenden wird deren Eignung bei der Positionsbestimmung und ihr Einfluss auf die Signalformen untersucht.

Die Kurve des ersten Segments für die Messung mit 600 steps/s ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Bei den eingestellten Parametern sind links zwei Peaks der gewünschten Form mit deutlichem lokalem Maximum vorhanden. Der dritte Peak hat zwar ebenfalls die geforderte Struktur, allerdings ist ein stärker ausgeprägtes lokales Maximum wünschenswert, um eine sichere Identifikation zu gewährleisten. Die weiteren Peaks bestehen aus sich überlagernden Minima. Prinzipiell sollten diese auch ein lokales Maximum aufweisen. Dieses ist aber bei den derzeitigen Sampling-Raten der ADCs nicht sichtbar.

### 3.5.1 Analyse der aufgenommenen Messdaten mittels Root

Um die Ortsauflösung zu bestimmen, werden die Messdaten mit ROOT analysiert und die Minima und Maxima im Verlauf identifiziert sowie die zugehörigen Positionsdaten des laserbasierten Positionssensors ausgewertet. Hierzu werden die aufgenommenen Daten jeweils in Segmente zerlegt, welche eine einzelne Schlittenbewegung



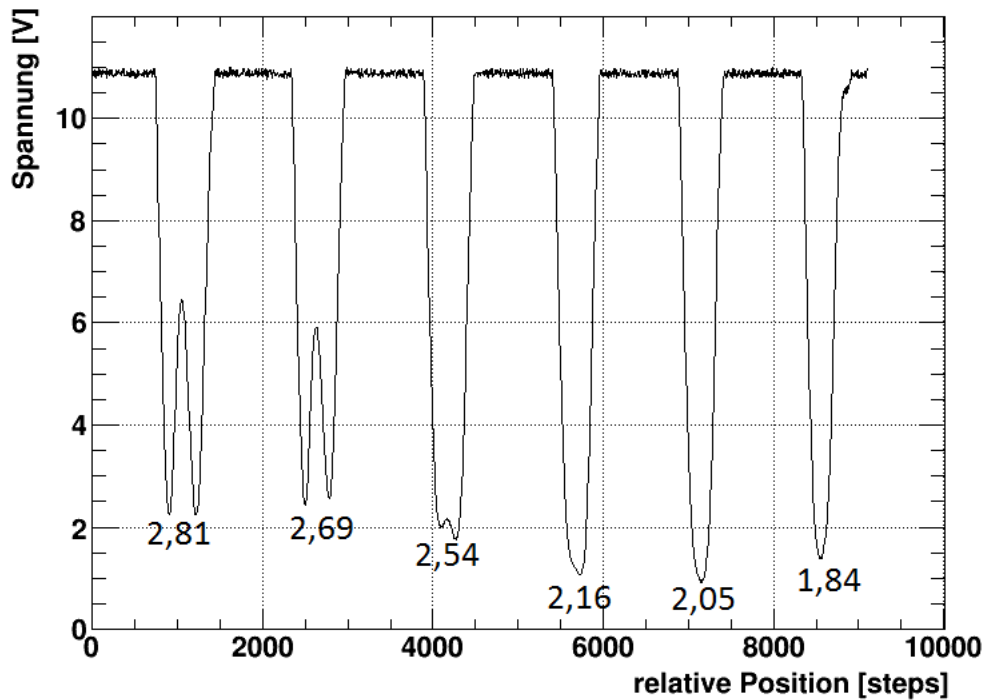


Abb. 3.15: Signalverläufe zur Messung der Ortsauflösung. Die beiden linken Peaks entsprechen der gewünschten Signalf orm. Der dritte Peak ist durch das nur schwach ausgeprägte lokale Maximum nicht wünschenswert. Bei den weiteren Peaks überlagern sich die Minima bei den gewählten Parametern zu einem einzelnen Minimum. Die Beschriftung der Signale bezeichnet die Gesamtbreite der jeweiligen Geometrie in mm.

enthalten. Auf diese Weise können Rechts- und Linksbewegungen unterschieden und getrennt betrachtet werden.

Innerhalb eines Segments werden jeweils die Spannung außerhalb der Signalstrukturen als Offset gemittelt und die Position der Peaks ermittelt. Als Vorgehensweise wird eine Signalschwelle gewählt. Fällt die Spannung unter diesen Wert, werden die vorherigen Werte untersucht bis der erste wieder  $0.3\text{ V}$  unter dem Offset liegt bzw. umgekehrt. Als Minima werden die jeweils kleinsten Werte gesucht, umgekehrt die größten für das lokale Maximum.

Der Zeitpunkt der Minima/Maxima wird abgeglichen mit den entsprechenden Positionsdaten und auf diese Weise die Position des Schlittens der optisch detektierten Zielposition zugewiesen. Unterschieden wird zwischen Signalen mit und ohne lokales Maximum. Für erstere dient das lokale Maximum zur Positionsbestimmung, sonst die des Minimums. Exemplarisch ist in Abbildung 3.16 die Analyse eines Segments dargestellt.

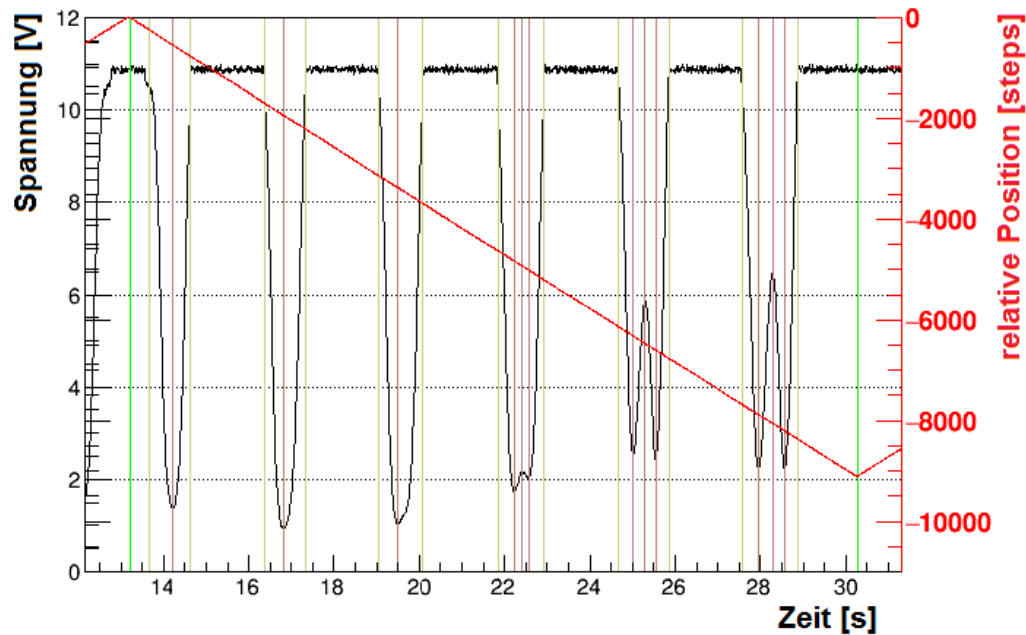


Abb. 3.16: Darstellung der Datenanalyse eines Segments durch Root. Signalpegel gegen den Zeitpunkt der Messung (schwarz). In rot und mit der zweite Achse ist die Position des Schlittens vermerkt. Die senkrechten Linie markieren die durch ROOT gewählten Punkte. Grüne Linie entspricht den Wendepunkten des Schlittens. In ocker die Grenzen der Signalstrukturen. In dunkelrot die gefunden Minima/Maxima. Man beachte die Spiegelung im Vergleich zu Abb. 3.15, bedingt durch eine umgekehrte Fahrtrichtung.

Die derart ermittelten Positionen werden in Histogrammen nach Bewegungsrichtung des Schlittens getrennt gesammelt. Ein resultierendes Histogramm ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Aus Tabelle 3.2 lässt sich die Korrelation von relativen Positionen mit den in Kapitel 3.3.1 bezeichneten Geometrien entnehmen.

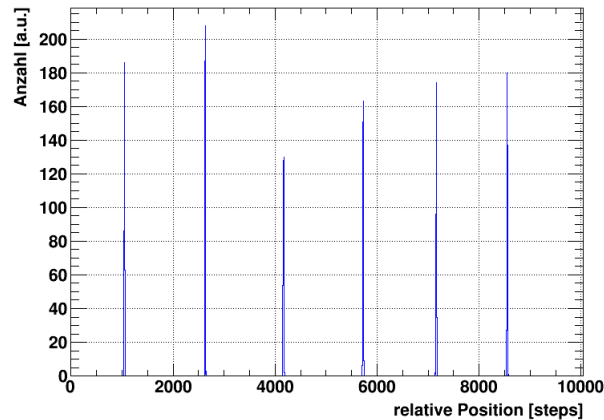


Abb. 3.17: Histogramm der, durch den Lichttaster ermittelten, Positionen. Die eingezeichneten Positionsdaten des laserbasierten Sensors entsprechen den zeitlich korrelierten Maxima/Minima des Lichttastersignals. Dargestellt ist die Verteilung bei Linksbewegungen des Schlittens.

| rel. Pos. | # | Breite der Geometrie |
|-----------|---|----------------------|
| ~1100     | 0 | $2,81 \pm 0,16$      |
| ~2600     | 1 | $2,69 \pm 0,17$      |
| ~4100     | 2 | $2,54 \pm 0,24$      |
| ~5700     | 3 | $2,16 \pm 0,13$      |
| ~7100     | 4 | $2,05 \pm 0,14$      |
| ~8500     | 5 | $1,84 \pm 0,13$      |

Tab. 3.2: Verwendete Geometrien mit zugehörigen relativen Positionen.

### 3.5.2 Richtungsabhängigkeit der Ergebnisse

Die Analyse der Messdaten mit 16354 Segmenten liefert für jede gemessene Geometrie eine gaußförmige Verteilung, aus deren Breite die Ortsauflösung des Lichttasters bestimmt werden kann. Es zeigt sich eine Verschiebung der Verteilungen für getrennt betrachtete Bewegungsrichtungen. In Abbildung 3.18 ist dies vergrößert dargestellt.

Eine derartige Verschiebung der Verteilungen ist an allen Geometrien zu beobachten. Die Verteilungen werden für beide Richtungen getrennt und auch für die kombinierten Daten mittels Gaußfit der Form

$$f(x) = Ae^{(-\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2)}$$

untersucht. Die resultierenden Mittelwerte  $\mu$  sind in Tabelle 3.3 aufgelistet. Ebenfalls berechnet wurde die Differenz der Abstände zwischen den Mittelwerten einzelner Bewegungen und der kombinierten Verteilung.

Auffällig ist, dass die Mittelwerte der verschiedenen Bewegungsrichtungen ungefähr im gleichen Abstand um den Mittelwert der kombinierten Daten liegen. Der Verdacht

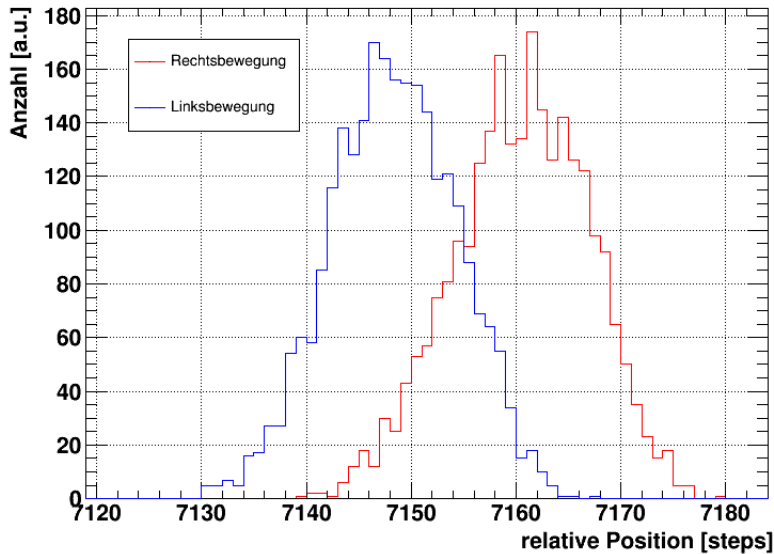


Abb. 3.18: Vergrößerte Darstellung der ermittelten Positionen des Signalmaximums für eine Geometrie, getrennt dargestellt sind beide Bewegungsrichtungen des Schlittens. Beide Verläufe für sich zeigen die erwartete Gaußform, jedoch gegeneinander verschoben.

fällt daher auf einen systematischen Fehler, welcher die Messungen aller Geometrien richtungsabhängig gleichermaßen betrifft.

Eine erste Möglichkeit wäre hier ein Einfluss des asymmetrischen Tastkopfes. Um dies auszuschließen wurden eine spezielle Messung durchgeführt, auf die in Kapitel 3.8 eingegangen wird.

Die wahrscheinlichere Ursache wurde bereits bei der Beschreibung des Messaufbaus in Kapitel 3.2 erwähnt. Aufgrund der Art der Datenaufnahme sind die Positionsdaten des laserbasierten Positionssensors immer relativ zu den Signalpegeln des Lichttasters verzögert. Dies würde je nach Fahrtrichtung des Schlittens eine Verschiebung der ermittelten Positionen in Fahrtrichtung bewirken. Sollte dies ursächlich sein, so müsste der Abstand zwischen den Verteilungen von der Fahrgeschwindigkeit des Schlittens abhängen, da die Datenaufnahme nicht von der Motorsteuerung abhängt.

### 3.5.3 Untersuchung der Richtungsabhängigkeit bezogen auf die Geschwindigkeit

Im Rahmen der Messreihe wurde mit verschiedenen, eingestellten Geschwindigkeiten gemessen. Eine direkte Auswertung, wie eingangs beschrieben, wird durch die in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Geschwindigkeitsschwankungen erschwert. Jede Messung enthält Daten mit mehreren verschiedenen Geschwindigkeiten.

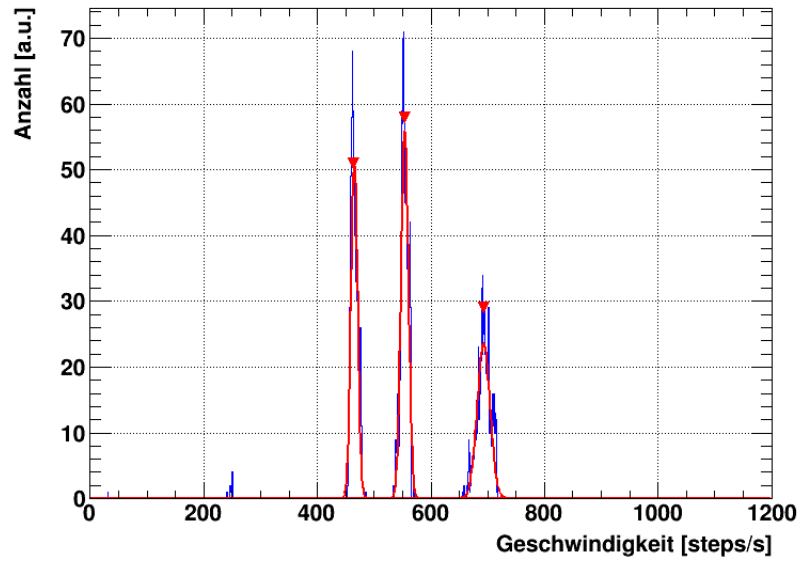


Abb. 3.19: Durch lineares Fitten ermittelte Geschwindigkeiten an Geometrie #4 bei eingestellter Geschwindigkeit  $600 \text{ steps/s}$ . Gaußfits wurden verwendet um die Positionen und Breiten der Verteilungen zu bestimmen.

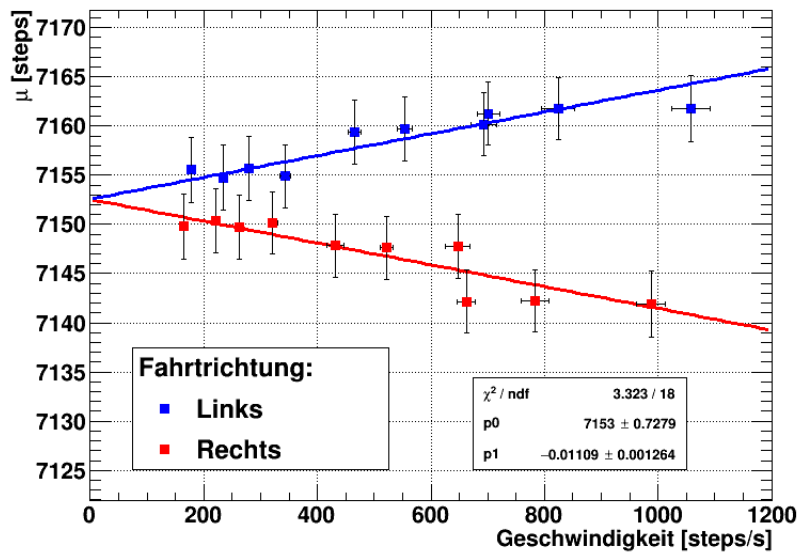


Abb. 3.20: Mittelwerte  $\mu$  der durch Lichttaster ermittelten Positionen für Geometrie # 4 gegen die Fahrgeschwindigkeit des Schlittens, dargestellt sind die Werte beider Bewegungsrichtungen. Fehlerbalken enthalten sowohl statistische als auch eine Abschätzung der systematischen Fehler. Für den Fit wurden Geraden mit identischem y-Achsenabschnitt gewählt.

| $\mu_{\text{Links}}$ | $\mu_{\text{Komb.}}$ | $\mu_{\text{Rechts}}$ | $ \mu_{\text{Komb.}} - \mu_{\text{Links}} $ | $ \mu_{\text{Komb.}} - \mu_{\text{Rechts}} $ |
|----------------------|----------------------|-----------------------|---|--|
| 1034,38±0,10         | 1041,59±0,13         | 1048,26±0,11          | 7,21±0,23                                   | 6,67±0,24                                    |
| 2614,43±0,11         | 2621,31±0,13         | 2628,98±0,10          | 6,89±0,24                                   | 7,67±0,23                                    |
| 4149,11±0,15         | 4156,47±0,16         | 4164,47±0,16          | 7,36±0,31                                   | 8,00±0,32                                    |
| 5718,72±0,13         | 5722,83±0,11         | 5726,99±0,14          | 4,11±0,25                                   | 4,16±0,25                                    |
| 7148,28±0,12         | 7154,36±0,13         | 7160,56±0,13          | 6,08±0,25                                   | 6,20±0,26                                    |
| 8540,61±0,12         | 8546,11±0,12         | 8551,31±0,13          | 5,50±0,24                                   | 5,20±0,25                                    |

Tab. 3.3: Mit Gaußfits bestimmte Mittelwerte der Positionsverteilungen in steps, getrennt nach Bewegungsrichtung des Schlittens und für die kombinierten Daten. Die Differenzen der Richtungen von der Kombination sind ebenfalls berechnet. Es ist eine symmetrische Verschiebung der Bewegungsrichtungen um den kombinierten Mittelwert zu beobachten.

Es werden daher die Messungen mit 300 steps/s, 600 steps/s und 900 steps/s kombiniert betrachtet. Zur Auswertung werden die einzelnen Messungen, wie zuvor beschrieben, untersucht. Zusätzlich wird über die Bereiche einer Geometrie, mittels linearem Fit der Positionsdaten gegen die Zeit, die lokale Geschwindigkeit bestimmt und in einem Histogramm für jede Geometrie und Fahrtrichtung gesammelt. Ein resultierendes Histogramm ist in Abb. 3.19 gezeigt. Durch Anwendung von Gaußfits werden Breiten und Mittelwert der auftretenden Geschwindigkeiten ermittelt.

Die Mittelwerte und Breiten können verwendet werden um die, in einer Messung auftretenden Geschwindigkeiten zu unterscheiden. Die Maxima/Minima-Positionen werden den jeweiligen Geschwindigkeitsbereichen zugeordnet, dabei werden jeweils Positionen, deren Geschwindigkeit  $\pm 2\sigma$  um einen ermittelten Geschwindigkeitswerte liegen, zu diesem hinzu gezählt.

Auf diese Weise können weitere Histogramme (für jeweils getrennte Geschwindigkeit) mit den ermittelten Positionen erzeugt werden. Erneut werden mit Gaußfits die Mittelwerte und Breiten der Positionsverteilungen ermittelt und die Ergebnisse gegen die Geschwindigkeit aufgetragen. In Abbildung 3.20 ist das Ergebnis für eine Geometrie dargestellt. Die Verläufe für die anderen Geometrien sind analog (siehe Anhang A.4).

### Diskussion des zu erwartenden Fehlers

Als Fehler wurde für die Geschwindigkeit die  $\pm 2\sigma$  Breite, der je Histogramm verwendeten Geschwindigkeiten benutzt. Für die Fehler der mittleren Positionen bietet sich der, beim Gaußfit ebenfalls bestimmte, Fehler des Mittelwerts  $\Delta\mu$  an. Allerdings enthält die Messung nicht nur statistische Fehler, es sind auch bereits mehrere systematische Fehler bekannt.

Zum einen wäre hier die Ausrichtung Tastkopf zur Oberfläche zu nennen, deren Einfluss derzeit unbekannt ist, jedoch näherungsweise bei allen Geometrien identisch und als eher gering einzuschätzen ist.

Von weitaus größerer Bedeutung war die mangelhafte Fixierung der Führungsschiene. Da diese Spiel hatte und sich während den Messungen leicht bewegen konnte, konnte sich auch der gesamte Schlitten (inklusive Logikplatte) relativ zur Bodenplatte und damit dem Lichttaster verlagern. Bewegungen der Schiene senkrecht zur Bewegungsachse würden eine Abstandsänderung zum Tastkopf bewirken oder den Winkel zwischen Tastkopf und Oberfläche variieren. Beides würde sich vermutlich hauptsächlich in einer minimalen Änderung der Signalform zeigen.

Jedoch war auch eine Verschiebung der Führungsschiene in Bewegungsrichtung möglich, was die durch den Lichttaster ermittelten Positionen direkt betrifft. Die Beweglichkeit der Schiene in Bewegungsrichtung wird stark unterdrückt, durch den ebenfalls in diese Richtung haltenden Motor. Da dieser in einer eigenen Verschraubung sitzt, wird dieser den Schlitten auch bei einer Verschiebung der Schiene auf näherungsweise gleicher Position halten. Da der Motor beidseitig über Kupferplättchen am Schlitten fixiert ist, ist von einem gewissen Spiel auszugehen. Anhand der beobachteten Beweglichkeit der Schiene nach den Messungen, wird der Fehler hier auf  $\pm 3$  steps des laserbasierten Positionssensors oder umgerechnet  $\pm 15 \mu\text{m}$  abgeschätzt.

Dieselbe Verschiebung deutet sich in Abbildung 3.20 bereits an. Werden die Werte für  $\approx 650$  steps/s betrachtet, so sieht man einen Unterschied der mittleren Position für nahezu identische Geschwindigkeiten. Beide Einträge stammen aus unterschiedlichen Messungen, durch die Messdauern sind die Datenaufnahmen der besagten Punkte um etwa drei Tage getrennt. Es ist somit davon auszugehen, dass in dieser Zeit die Schiene gewandert ist.

Im Folgenden wird zusätzlich zum statistischen Fehler in der Abbildung auch ein systematischer Fehler von  $\pm 3$  steps angenommen.

#### **Geschwindigkeitskompensation der Messdaten**

Unter der Annahme, dass die beobachtete Verschiebung der Mittelwerte von der näherungsweise konstanten Verzögerung in der Datenaufnahme abhängt, müsste ein linearer Verlauf zu beobachten sein. In Abbildung 3.20 sind die linearen Verläufe auch zu beobachten, folglich ist vermutlich die Verzögerung für die Verschiebung verantwortlich.

Aus den Daten der Abbildung kann mittels eines Fits der Einfluss der Verzögerung bestimmt und dieser anschließend in den Messdaten korrigiert werden. Als y-Achsenabschnitt wäre der ohne Verzögerung gemessene Mittelwert zu erwarten, dieser sollte für beide Fahrtrichtungen identisch sein. Es ist daher naheliegend, die entsprechenden Graphen mittels zweier linearer Fits mit gemeinsamen Achsenabschnitt zu analysieren. Da zudem der Betrag der Verzögerung nicht von der Fahrtrichtung abhängen sollte, muss auch für die Steigungen  $a$

$$a_{\text{links}} = -a_{\text{rechts}}$$

gelten.

Daher wurde ein simultaner Fit gewählt, bei dem die Steigung mit unterschiedlichem Vorzeichen sowie der, für beide Richtungen identische Achsenabschnitt, gleich-

zeitig durch den Fitter berücksichtigt werden. Die resultierenden Parameter sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

| # | Steigung $a$ | $\Delta a$ | Achsenabschnitt $b$ | $\Delta b$ |
|---|--------------|------------|---------------------|------------|
| 0 | 0,012        | 0,001      | 1040,599            | 0,720      |
| 1 | 0,012        | 0,001      | 2620,885            | 0,719      |
| 2 | 0,013        | 0,001      | 4155,601            | 0,744      |
| 3 | 0,008        | 0,001      | 5721,674            | 0,730      |
| 4 | 0,011        | 0,001      | 7152,552            | 0,728      |
| 5 | 0,009        | 0,001      | 8543,977            | 0,725      |

Tab. 3.4: Fitparameter der linearen Fits für die Positionsmittelwerte gegen Geschwindigkeiten.

Mit diesen Parametern kann nun für jedes gemessene Signal eine Kompensation der Geschwindigkeit auf Null erfolgen. Hierzu wird die Formel

$$p_0^{\text{Komp.}} = p^{\text{Mess}}(v) - av$$

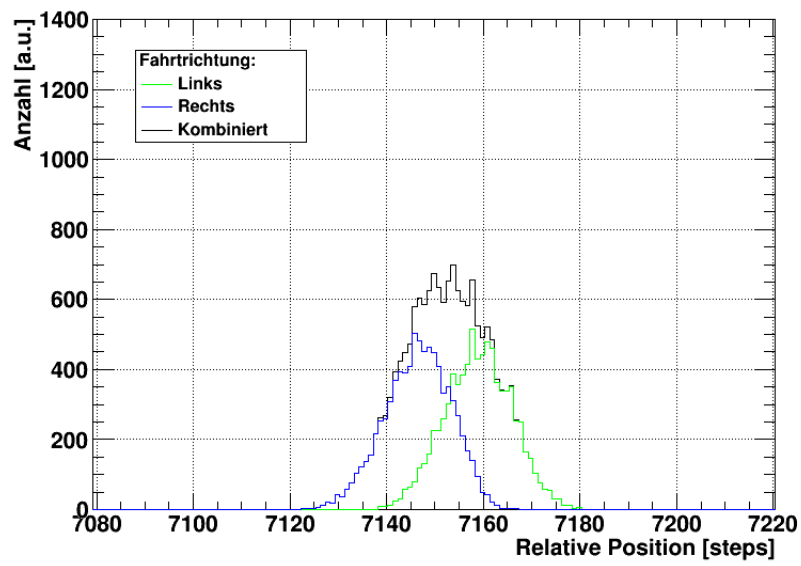
verwendet (Vorzeichen je nach Fahrtrichtung).

Da wie erwartet eine lineare Verschiebung durch die Geschwindigkeit vorliegt, wird bei den kompensierten Daten der Unterschied zwischen den Bewegungsrichtungen näherungsweise wegfallen. In Abbildung 3.21 ist für eine Geometrie die Positionsverteilung vor und nach der Kompensation gezeigt.

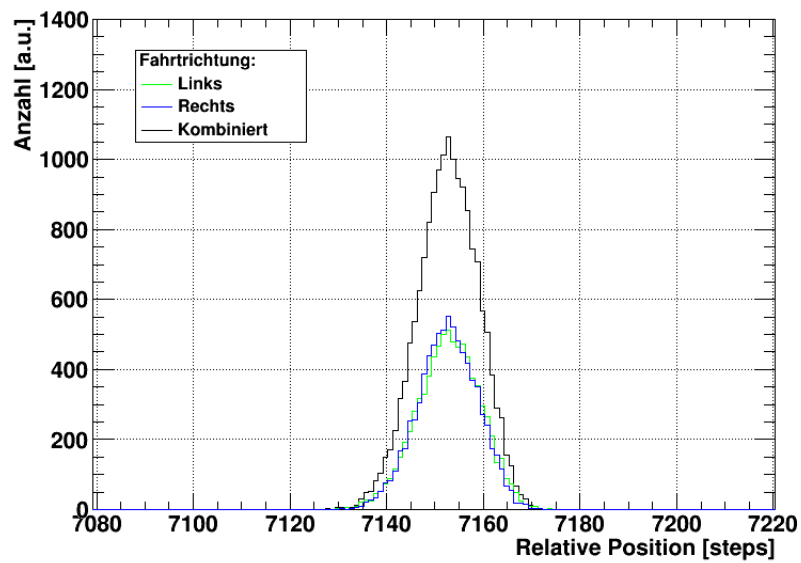
Durch die beschriebene Kompensation kann somit die Verschiebung zwischen den Verteilungen korrigiert werden.

Da die Verschiebung somit ein systematischer Fehler bedingt durch den Messaufbau ist, ist die Verschiebung für die Qualität des Lichttasters als Sensor ohne Belang. Bei der Untersuchung der Ortsauflösung sollte die Verschiebung folglich so weit wie möglich eliminiert werden, um realistische Werte für die Auflösung zu ermitteln.





(a) Ohne Kompensation



(b) Mit Kompensation

Abb. 3.21: Vergleich einer Geometrie vor und nach der Kompensation der Geschwindigkeit. Dargestellt ist jeweils die Rechts- und Linksbewegung, sowie die kombinierte Verteilung.

### 3.5.4 Analyse der Ortsauflösung

Als wesentliche Information über den Lichttaster soll dessen Ortsauflösung bestimmt werden. Der systematische Fehler durch die Verzögerung in der Datenaufnahme kann wie oben gezeigt eliminiert werden.

Aus der in Abbildung 3.21a dargestellten Positionsverteilung, sowie derselben für die anderen Geometrien, können jeweils mit einem Gaußfit Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$  der Verteilungen bestimmt werden. Als Maß für die Ortsauflösung des Lichttasters kann dann die Halbwertsbreite

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$$

verwendet werden.

In Tabelle 3.5 sind die resultierenden Fitparameter aufgelistet. Unter Berücksichtigung der Auflösung des laserbasierten Positionssensors von  $5 \mu\text{m}/\text{step}$  lassen sich die Halbwertsbreiten auch in  $\mu\text{m}$  darstellen.

| A             | $\mu$ [steps] | $\sigma$ [steps] | FWHM [steps] | FWHM [ $\mu\text{m}$ ] |
|---------------|---------------|------------------|--------------|------------------------|
| 1180,17±11,04 | 1041,14±0,04  | 5,50±0,03        | 12,95±0,07   | 64,75±0,33             |
| 1243,40±11,66 | 2621,17±0,04  | 5,22±0,03        | 12,29±0,06   | 61,45±0,32             |
| 846,74± 7,83  | 4155,68±0,06  | 7,64±0,04        | 17,99±0,09   | 89,96±0,44             |
| 1005,03± 9,38 | 5722,24±0,05  | 6,39±0,03        | 15,05±0,08   | 75,26±0,38             |
| 1032,06± 9,80 | 7153,29±0,05  | 6,28±0,03        | 14,79±0,08   | 73,97±0,40             |
| 1042,89± 9,93 | 8546,14±0,05  | 6,23±0,03        | 14,67±0,08   | 73,34±0,40             |

Tab. 3.5: Fitparameter der Positionsverteilungen. Nur statistische Fehler sind angegeben.

Somit liegt bereits in der schlechtesten Messung die Auflösung über den geforderten  $100 \mu\text{m}$ . Dies ist umso besser, wenn man die systematischen Fehler bedenkt, welche bisher am Aufbau erkannt wurden.

Dies waren die variable Geschwindigkeit durch mechanische Probleme sowie die Verzögerung in der Datenaufnahme. Durch eine lineare Kompensation wurde zwar der Großteil dieses Effekts entfernt, allerdings unter der Annahme einer konstanten zeitlichen Verzögerung. Vermutlich unterliegt die Verzögerung jedoch auch einem Jitter, so dass hier immer noch ein Resteinfluss auf die Auflösung zu vermuten ist. Der mit Abstand größte systematische Fehler ist jedoch die nicht korrekt fixierte Führungsschiene. Hier war die erste Abschätzung des Fehlers, die verwendet wurde, bei  $15 \mu\text{m}$ . Zusätzlich kommen jedoch auch Fehler durch die seitliche Versetzung der Schiene und den damit verbundenen Änderungen der Strahlgeometrie hinzu. Eine erneute Messung mit verbesserter Systematik wäre erforderlich, um die potentielle Auflösung besser zu bestimmen.

Die beste Auflösung erreichen scheinbar die sehr dünnen Plateaus, welche lediglich zu einem Minimum (Geometrien 0,1) führen. Überlagern sich zwei Minima (Geometrie 2,3), so wird durch die resultierende Verzerrung des Signals die Ortsauflösung

negativ beeinflusst. Hieraus kann geschlossen werden, dass für die Ortsauflösung vor allem die Form des Signals (siehe Abb. 3.15) entscheidend ist. Während die Breite der Geometrien immer weiter ansteigt, zeigt die Auflösung für größere Breiten wieder eine deutliche Verbesserung, sobald ein lokales Maximum entsteht.

Zwar zeigen die Peaks mit lokalem Maximum eine minimal schlechtere Auflösung. Der Vorteil liegt in der besseren Identifizierbarkeit im Vergleich zu einzelnen Peaks und einer einfacheren Umsetzung der Positionierung mit einer Steuersoftware.

Ein bisher wenig beachtetes Problem stellt zudem die Abtastrate des ADCs dar. Verwendet wurde hier die kostengünstige Lösung über die internen ADCs des BeagleBone Blacks mit einer relativ geringen Abtastrate bedingt durch EPICS. Dies sollte dazu führen, dass die Signale umso schlechter aufzulösen sind, je höher die Geschwindigkeit des Schlittens wird.

Aus den bereits bestimmten Daten lässt sich dies verdeutlichen, betrachtet man in Abbildung 3.22 die  $\sigma$ 's der nach Geschwindigkeit getrennten Positionsverteilungen aus Kapitel 3.5.3, so ist deutlich zu sehen, dass die Auflösung von der Geschwindigkeit abhängt.

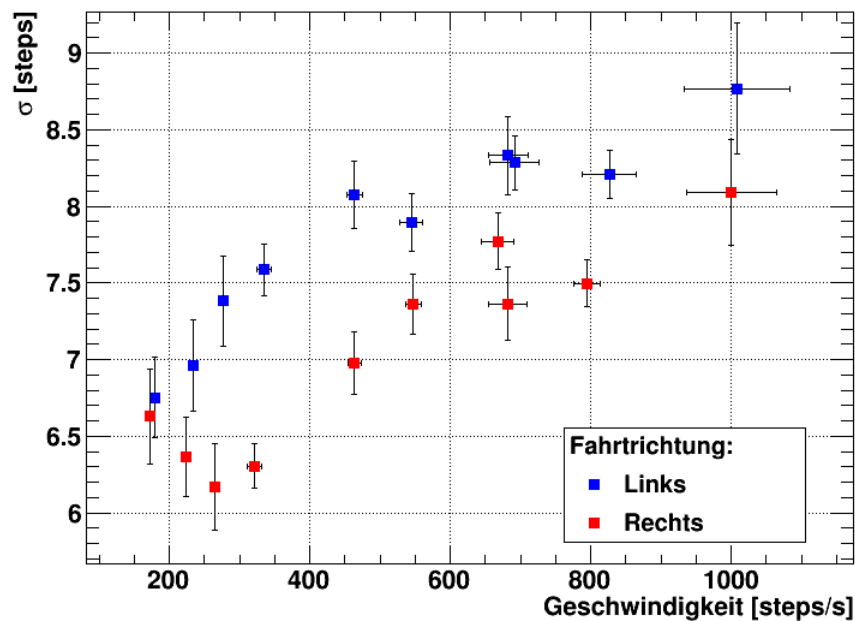


Abb. 3.22: Geschwindigkeitsabhängigkeit der Ortsauflösung. Dargestellt sind die zugehörigen  $\sigma$  der für Abb. 3.20 durchgeführten Fits (siehe Kapitel 3.5.3)

Zusammengefasst ist die Ortsauflösung für die Anwendung im Primärtargetaufbau mehr als ausreichend, es verbleibt genügend Sicherheitsabstand bei der Positionierung für eine mechanische Umsetzung, welche schlussendlich die geforderte Genauigkeit

einhalten muss. Durch Verbesserungen am ADC und der mechanischen Umsetzung sind auch noch Verbesserungen zu erzielen, falls diese notwendig werden sollte.

## 3.6 Einfluss der Oberflächengeometrie auf die Signalform

Es wurde gezeigt, dass der Tastkopf hinreichend genaue Positionsdaten liefern kann. Eine weitere wünschenswerte Eigenschaft wäre die Möglichkeit der Identifikation einer Geometrie über das gemessene Signal. Auf diese Weise könnte die Stellung des Schlittens, also welcher Targetmotor vor der Öffnung des Strahlrohrs steht, gleichzeitig mit der korrekten Targetpositionierung überprüft werden. Dies würde speziell zu diesem Zweck eingebrachte Hardware und damit Platz in der Vakuumkammer sparen und aufgrund der verringerten Anzahl von Komponenten die Ausfallsicherheit erhöhen.

Um die Vorüberlegung zur Verwendung von Lichttastern noch einmal kurz zusammenzufassen: Die Halbwertsbreiten sollten durch die Gestalt der Geometrie beeinflusst werden können, sie sollten proportional mit der Breite der Geometrie ansteigen. Die Anstiegs- und Abfallzeiten dagegen sollten bei den verwendeten Geometrien in erster Näherung konstant sein, da die reflektierende Fläche pro Längeneinheit in Bewegungsrichtung an den Kanten der verwendeten Geometrien identisch ist. Veränderungen der Winkel und damit der Anstiegslängen sollten die Minima verbreitern, ohne dabei das lokale Maximum zu beeinflussen. Im Gegensatz dazu sollte die Breite des Plateaus das lokale Maximum verstärken oder abschwächen. Aufgrund der Abhängigkeit aller Größen von der Strahlgeometrie hängen sie auch von der Justage des Lichttasters, insbesondere des Abstandes von der Oberfläche ab.

Im Folgenden soll der Einfluss der Geometrien auf die Signalformen überprüft werden.

### 3.6.1 Methodik der Analyse

Die Konstruktion der Logikplatte ermöglichte die Messung an einer Vielzahl unterschiedlicher Geometrien (siehe Kapitel 3.3.1). Aus den Signalverläufen kann ohne größeren Aufwand die Anstiegs- und Abfallzeit, sowie die Halbwertsbreite ermittelt werden.

Zur Analyse werden aus den jeweiligen Signalen die Zeiten zu extrahieren. Für die Anstiegs- bzw. Abfallzeit wird jeweils der erste Anstieg, bzw. der letzte Abfall des Signals verwendet - für ein Signal der gewünschten Form Minimum-Maximum-Minimum, die benötigte Zeit für den Abfall aus Sättigung des Sensors bis zum ersten Minimum bzw. des Anstieg vom zweiten Minimum bis zur Sättigung. Hierbei wird die Zeitspanne zwischen 10% und 90% der Differenz zwischen Mittelwert des Signals in Sättigung und der Amplitude des entsprechenden Minimums berechnet. Für die Halbwertsbreite wird die Zeitdifferenz zwischen halben Abfall auf das erste Minimum und den halben Anstieg nach dem zweiten Minimum berechnet. Zur Verdeutlichung siehe auch Abb. 3.23.

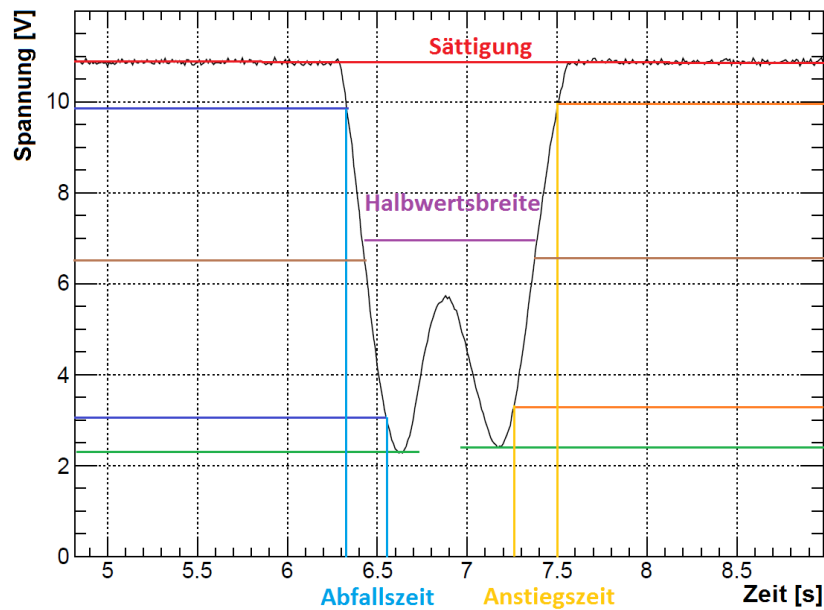


Abb. 3.23: Skizze zur Definition von Anstiegs- und Abfallszeit bzw. Halbwertsbreite an einem Beispiel.

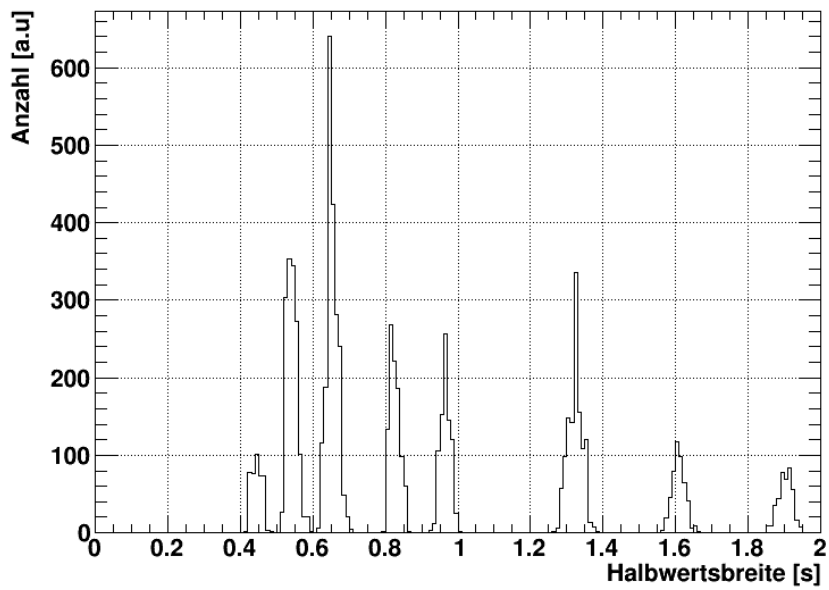
Leider sind die Zeiten aufgrund der schwankenden Geschwindigkeit des Aufbaus nicht aussagekräftig. Da die Zeiten mit der Dauer korrelieren, die der Schlitten benötigt, um eine Geometrie unter dem Lichttaster hindurch zu bewegen, ist ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen Schlittengeschwindigkeit und den gemessenen Zeiten zu erwarten.

Dargestellt als Histogramm sind in Abbildung 3.24a die Halbwertsbreiten einer Geometrie. Ein Vergleich mit Abb. 3.14 zeigt, dass für jede auftretende Geschwindigkeit ein eigener Peak entsteht. Ohne Kenntnis der Geschwindigkeit ist daher kein Vergleich verschiedener Halbwertsbreiten möglich. Analog ist die Situation für Anstiegs- und Abfallzeit. Um den prinzipiellen Verlauf der Zeiten gegen die Geometriebreiten zu überprüfen, wird versucht, die Anstiegs-/Abfallzeiten und Halbwertsbreiten ohne Geschwindigkeitseinfluss zu bestimmen und deren Veränderung gegen die Form der Geometrie zu überprüfen.

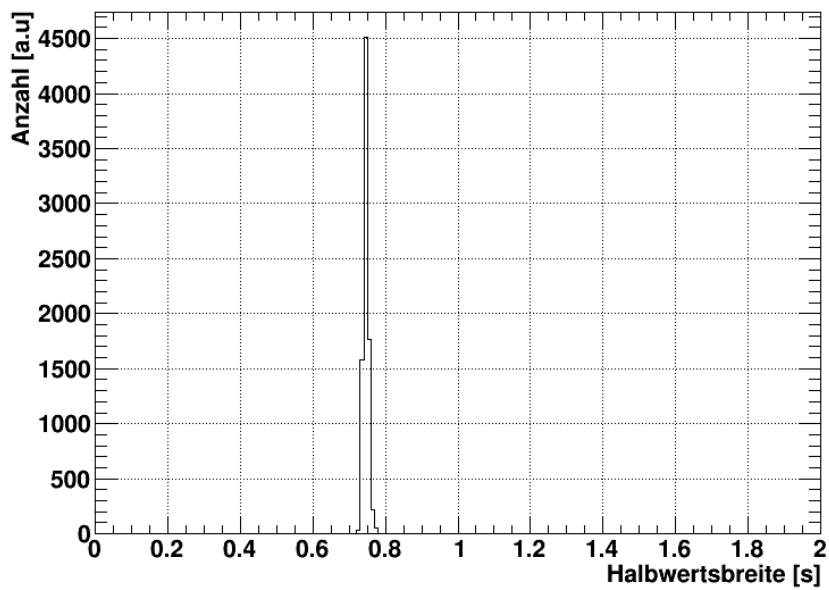
Analog zum letzten Kapitel ist es möglich, unter Kenntnis der Geschwindigkeit, die Zeiten zu kompensieren. Es werden alle ermittelten Anstiegs-/Abfallzeiten bzw. Halbwertsbreiten getrennt nach Geometrie und Geschwindigkeit in Graphen aufgetragen. Im Fall der Halbwertsbreite an Geometrie #2 ist dies in Abb. 3.25 gezeigt.

Anhand des 2D-Histogramms kann abgelesen werden, dass nur eine geringe Anzahl von Punkten nicht auf dem erwarteten antiproportionalen Verlauf liegen. Für die Kompensation der Messdaten werden die Parameter des Verlaufs benötigt, daher wird die Funktion

$$f(x) = \frac{a}{v} + b$$

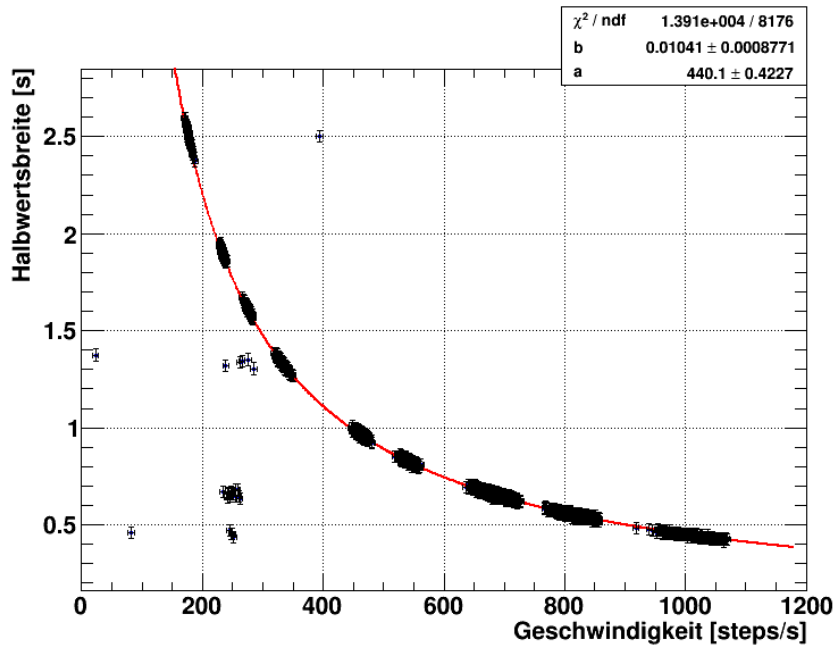


(a) Ohne Kompensation der Geschwindigkeit

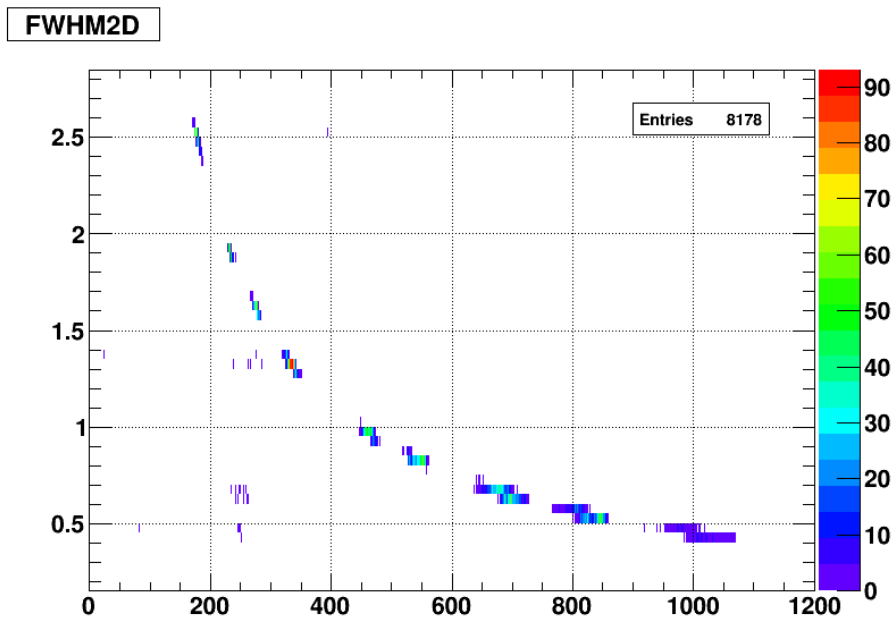


(b) Mit Kompensation auf 600 steps/s

Abb. 3.24: An Geometrie #2 bei einer Linksbewegung ermittelte Halbwertsbreiten, dargestellt als Histogramme jeweils vor und nach der Kompensation unterschiedlicher Geschwindigkeiten.



(a)



(b)

Abb. 3.25: An Geometrie #2 bei einer Linksbewegung ermittelte Halbwertsbreiten, aufgetragen gegen die jeweilige Geschwindigkeit des Aufbaus, bei der die Zeit gemessen wurde. Dargestellt als Graph mit Fehlerbalken und als 2D-Histogramm. Zur Anpassung die Kurve wurde ein  $\frac{1}{v}$ -Fit verwendet.

an die Kurve gefittet. Die resultierenden Fitparameter (für Halbwertsbreiten siehe Tabelle 3.6, für Anstiegs- und Abfallszeiten siehe Abbildungen in Anhang A.5) können verwendet werden, um die Anstiegszeiten in den Messungen auf eine einheitliche Geschwindigkeit zu kompensieren. Für die folgende Auswertung wird hierzu eine Geschwindigkeit von  $600 \text{ steps/s}$  gewählt. Die Kompensation kann durch

$$t_{\text{Komp}} = t_{\text{Mess}} + a \left( \frac{1}{600} - \frac{1}{v} \right)$$

erfolgen. Angewandt auf die Zeiten der Geometrie #2, resultiert dies in dem in Abb. 3.24b dargestellten Histogramm. Es verbleibt ein einzelner scharfer Peak, dessen Mittelwert und quadratischer Fehler als Halbwertsbreite der Geometrie bestimmt wird. Analog verläuft die Untersuchung für die Anstiegs- bzw. Abfallszeiten.

| # | $a$   | $\Delta a$ | $b$   | $\Delta b$ | # | $a$   | $\Delta a$ | $b$   | $\Delta b$ |
|---|-------|------------|-------|------------|---|-------|------------|-------|------------|
| 0 | 525.1 | 0.5        | 0.007 | 0.001      | 5 | 527.0 | 0.5        | 0.008 | 0.001      |
| 1 | 482.3 | 0.4        | 0.008 | 0.001      | 4 | 485.3 | 0.4        | 0.011 | 0.001      |
| 2 | 440.1 | 0.4        | 0.010 | 0.001      | 3 | 442.2 | 0.4        | 0.010 | 0.001      |
| 3 | 385.1 | 0.4        | 0.012 | 0.001      | 2 | 383.4 | 0.4        | 0.013 | 0.001      |
| 4 | 348.9 | 0.4        | 0.011 | 0.001      | 1 | 349.8 | 0.4        | 0.012 | 0.001      |
| 5 | 312.7 | 0.4        | 0.009 | 0.001      | 0 | 316.1 | 0.4        | 0.006 | 0.001      |

(a) Linksbewegung

(b) Rechtsbewegung

Tab. 3.6: Fitparameter für die Halbwertsbreiten beider Fahrrichtungen.

### 3.6.2 Verschiedene Breiten der Geometrien

Bereits bei der Justage des Lichttasters war der Einfluss der Plateaubreite bzw. des Abstandes von der Oberfläche untersucht worden. Hierbei wurde festgestellt, dass die Plateaubreite nur bedingt relevant ist. Erst in Kombination mit dem Abstand des Lichttasters wird die Signalform festgelegt. Da für die Halbwertsbreiten die Gesamtbreite der Geometrie von Relevanz ist und nicht die Plateaubreite, wird im Folgende nur die Gesamtbreite betrachtet.

Wird die zuvor beschriebene Analyse auf die Messdaten angewandt und die resultierenden Zeiten gegen die jeweiligen Breiten aufgetragen, wird der eingangs erwähnte Verlauf erwartet. Die Abbildungen 3.27, 3.28 und 3.26 zeigen die gemessenen Verläufe für Anstiegs-, Abfallzeit und Halbwertsbreite. Rechts- und Linksbewegung sind jeweils getrennt dargestellt.

Der direkte Vergleich der Kurven zwischen Rechts- und Linksbewegungen des Schlittens zeigt keine Unterschiede. Folglich macht die Fahrrichtung keinen Unterschied für die Zeiten, da jeweils Anstiegszeit der einen Richtung und Abfallzeit der anderen zusammen dargestellt sind, entspricht dies auch der Erwartung - aufgelöst wird lediglich die Oberflächenstruktur der Logikplatte.



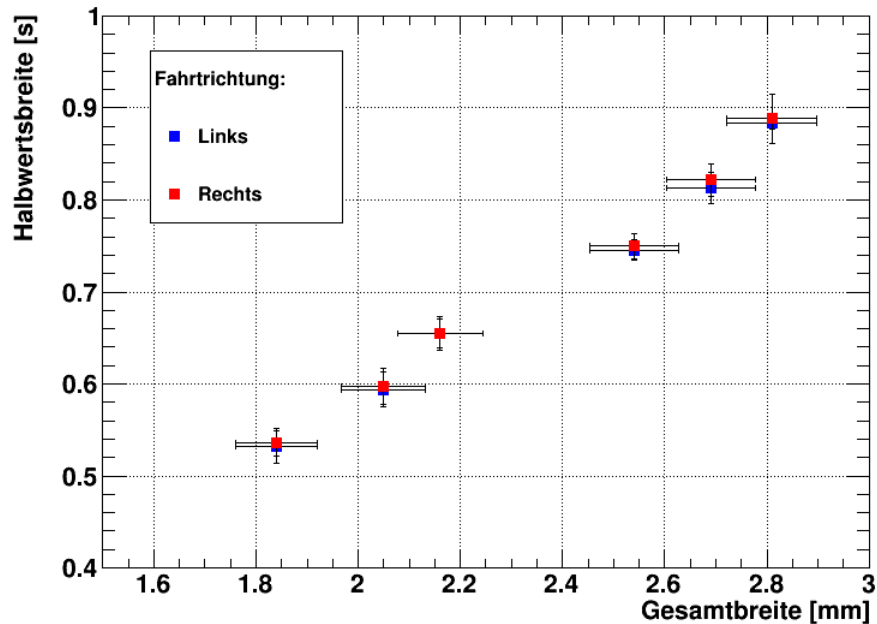


Abb. 3.26: Halbwertsbreite der Geometrien. Es zeigt sich eine klare Korrelation zwischen gemessener Halbwertsbreite und der Gesamtbreite der Reflektorgeometrien. Über eine Messung der Halbwertsbreite kann daher die Geometrie identifiziert und so die Stellung des Schlittenaufbaus bestimmt werden.

Anstiegs- und Abfallzeiten zeigen den erwarteten, näherungsweise konstanten Verlauf, die minimale Abweichung wird vermutlich eine Folge der diffusen Reflexion an der Oberfläche, bedingt durch Kratzer und sonstigen Unebenheiten sein.

Auch die Halbwertsbreite folgt dem erwarteten Verlauf, da letztlich durch die Halbwertsbreite die Breite der Plateaus vermessen wird. Es ist ohne größere Probleme möglich, aus einer Halbwertsbreite eines Signals die Gesamtbreite der Geometrie zu ermitteln, vorausgesetzt man kennt die Geschwindigkeit.

Die relative Genauigkeit, mit der die Halbwertsbreiten bestimmt werden können - im Vergleich zu ihrer Amplitude - lassen zudem eine Kodierung des Orts zu, da über die Halbwertsbreite zuverlässig die zugrundeliegende Geometrie bestimmt werden kann.

Im Wesentlichen zeigt sich durch diese Untersuchung, dass eine konstante bzw. bekannte Schlittengeschwindigkeit notwendig ist, wenn Zeitspannen zur Identifikation verwendet werden sollen. Es muss also entweder ein Weg gefunden werden, Geschwindigkeiten am Primärtarget zu messen. Möglicherweise wäre dies auch mit einem Lichttaster unter Verwendung einer äquidistanten kammartigen Struktur und Auszählung der entstehenden Pulse realisierbar. Oder die Mechanik muss soweit verbessert werden, dass ein konstanter Schlittenlauf über längere Zeiten sichergestellt ist.

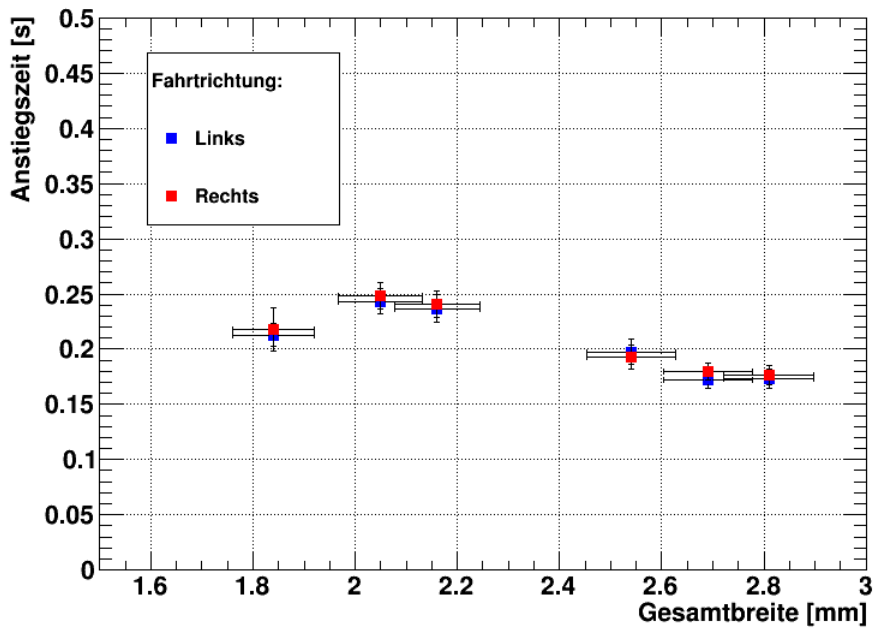


Abb. 3.27: Anstiegs- bzw. Abfallszeiten der Signale an den linken Kanten der Geometrien - dies entspricht bei einer Linksbewegung die zuerst gesehenden Kanten.

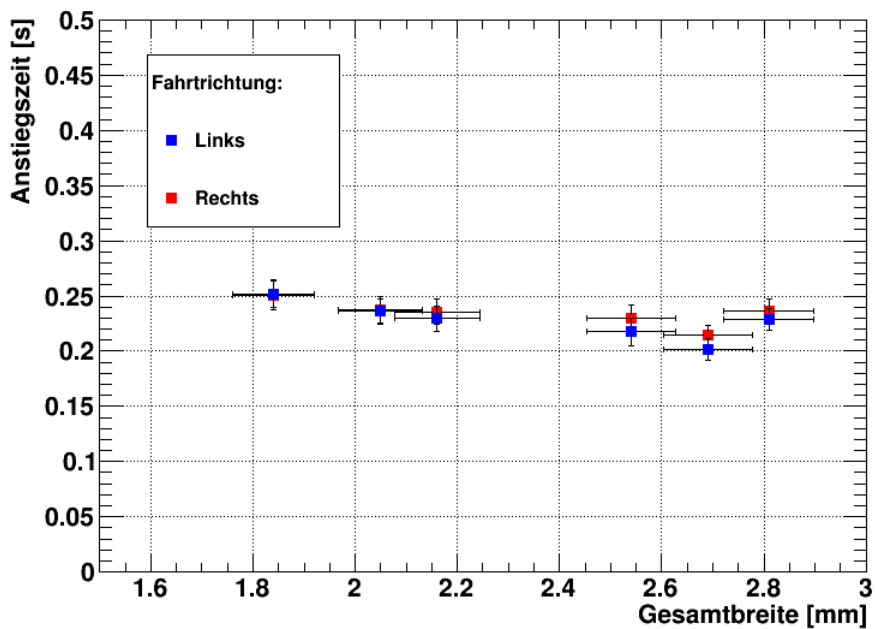


Abb. 3.28: Anstiegs- bzw. Abfallszeiten wie in Abb. 3.27, rechte Kanten der Geometrien.

Zudem unterliegen die Parameter der Geometrie gewissen Grenzen. Wird eine Signalstruktur mit doppelten Minimum gewünscht, so muss zwangsläufig die Breite des Plateaus innerhalb eines engen Bereichs bleiben. Variationen der Plateaubreite sind daher nur bedingt zielführend.

## 3.7 Geometrien mit verschiedenen Kanten

Bisher wurde der Lichttaster nur an Geometrien mit gleichen Kanten und unterschiedlichen Breiten getestet. Durch die Logikplatte stehen Geometrien mit verschiedenen Winkeln an den Kanten und gleichbleibenden Plateaus zur Verfügung. In Tabelle 3.7 sind die wesentlichen Geometrien und die zugehörigen relativen Positionen in den folgenden Daten präsentiert.

| rel. Pos. [steps] | #  | Gesamtbreite der Geometrie [mm] | Soll Winkel [°] |
|-------------------|----|---------------------------------|-----------------|
| ~ 300             | 11 | $1,46 \pm 0,077$                | 20              |
| ~1600             | 10 | $1,74 \pm 0,081$                | 30              |
| ~3000             | 9  | $2,14 \pm 0,083$                | 40              |
| ~4400             | 8  | $2,75 \pm 0,087$                | 50              |
| ~6100             | 7  | $3,60 \pm 0,095$                | 60              |
| ~8100             | 6  | $6,32 \pm 0,125$                | 70              |

Tab. 3.7: Verwendete Geometrien im Vergleich zur relativen Position.

Der Vorteil der Variation der Kanten liegt darin begründet, dass die Plateaubreite konstant bleiben kann. Diese ist zugleich primär für das Entstehen des lokalen Maximums verantwortlich. Durch flachere Kanten wird die Gesamtbreite einer Geometrie ebenfalls vergrößert. Die resultierende Verbreiterung der Minima stellt dagegen kein Problem dar, da diese für die Positionsbestimmung ohne Relevanz sind. Eben diese Möglichkeit war unter anderem ein Grund, weshalb ursprünglich diese Signalform bevorzugt wurde. Die verschiedenen Winkel sind dagegen ohne Belang, solange das reflektierte Licht nicht auf den Tastkopf fällt.

Bedingt durch der Beschädigung des Motors konnten für verschiedene Kanten nur unzureichend Messdaten aufgenommen werden. Auch für diese Messung sind Geschwindigkeitsvariationen festzustellen, die sich durch eine erneute Fixierung der Schiene nicht abstellen ließen.

Ebenfalls festzustellen ist nun eine stärkere Variation der Geschwindigkeit während einer Bewegung. Hierzu wurden in [Boe17] die Geschwindigkeit innerhalb eines Segments näher untersucht, indem das Segment in acht gleiche Teilstücke unterteilt wurde. Der Vergleich der Geschwindigkeiten der Teilstücke mit der mittleren Geschwindigkeit des Gesamtsegments, zeigt eine verstärkte Abweichung von dieser im Bereich der Umkehrpunkten der Schlittenbewegung.

Die Geschwindigkeitsschwankungen verzerren teilweise die, durch den ADC aufgenommenen, Signalformen und führen zu Problemen in der Auswertung. Insbesondere

die Bestimmung von Zeiten wird wesentlich ungenauer, da diese mit festen Schwellwerten arbeiten, und daher die Ergebnisse in einem großen Bereich variieren.

Zudem liegen nur die Daten von einer Messperiode von 24 h vor. Durch das starke Rauschen der Geschwindigkeiten ist eine Kompensation wie im vorherigen Kapitel nicht möglich. Eine alternative, wenn auch ungenauere Möglichkeit besteht darin, für die Auflösung lediglich eine Fahrtrichtung zu betrachten. Zwar sind auch einzelne Fahrtrichtungen durch die Verschiebung des detektierten Orts, bedingt durch die Verzögerung in der Datenaufnahme, betroffen. Der Einfluss auf die Messung ist jedoch weitaus geringer als für beide Richtungen kombiniert. Dafür wird die Statistik, der sowieso bereits kurzen Messung (entsprechend nur 12 h bei  $600 \text{ steps/s}$ , vergleiche vorherige Messungen), noch weiter reduziert.

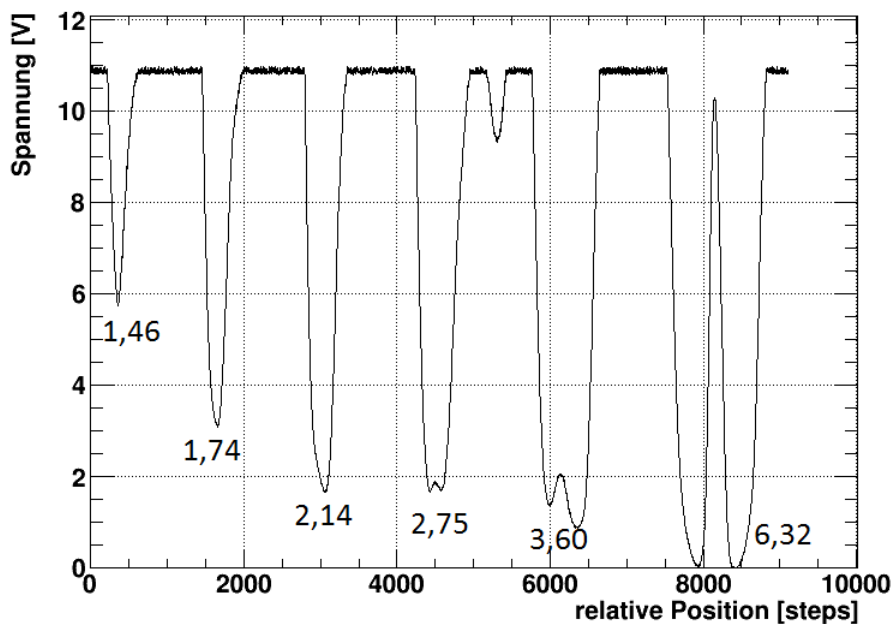


Abb. 3.29: Aufgenommenes Signal für ein Segment mit verschiedenen Kanten der Geometrien, dargestellt ist eine Linksbewegung. Die Beschriftung der Signale entspricht den Gesamtbreiten der Geometrien in mm.

In Abbildung 3.29 ist ein Segment dargestellt. Im Vergleich zu den Messungen mit unterschiedlichen Plateaus sehen wir erneut drei Peaks mit lokalen Maxima. Interessant ist insbesondere die Gestalt der Peaks. So fällt auf, dass die Minima bei sehr flachen Kanten breiter werden, ganz den Erwartungen entsprechend. Das lokale Maximum dagegen bleibt scheinbar unverändert in der Breite.

Anhand der Amplitude der Peaks lässt sich zudem sehen, dass die wegreflektierende Fläche der Kanten teilweise zu gering ist. Als Resultat wird zu wenig Licht wegreflektiert und die Signalamplituden (Relativ zur Sättigung) sind verringert.

Unerklärt bleibt das Auftreten des Signals bei einer relativen Position von  $\approx 6500$  steps. Vermutlich handelt es sich hierbei um das Resultat eines Oberflächen-defektes der Logikplatte. Bei nähere Betrachtung der Oberfläche ist eine minimale Vertiefung der Oberfläche zu beobachten. Möglicherweise führt dies zu dem sichtbaren Abfall im Sensorsignal.

Da die Analyse ansonsten wie zuvor abläuft, ist das Prozedere ansonsten identisch. Aus den Minima/Maxima-Positionen, die aus den Peaks wie in Abb. 3.29 ermittelt wurden, kann wieder die Ortsauflösung ermittelt werden. Verwendet werden nur die Ergebnisse der Linksbewegungen. In Abbildung 3.30 ist exemplarisch die Positionsverteilung für eine Geometrie dargestellt, mit Gaußfits werden die Auflösungen bestimmt. In Tabelle 3.8 sind die Fitparameter sowie die Halbwertsbreite als Maß für die Auflösung dargestellt.

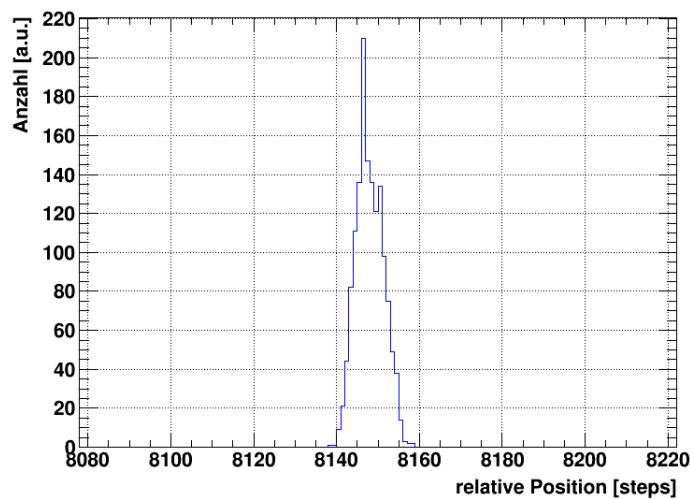


Abb. 3.30: Darstellung der ermittelten Positionen des Signalsmaximums für Geometrie #6. Lediglich die Linksbewegungen werden verwendet. Man beachte die Abweichung von einer Gaußform, die dargestellte Kurve sollte tatsächlich aus drei sich überlagernden Gauss, aufgrund der drei verschiedenen Geschwindigkeiten, bestehen.

Interessanterweise sind die Auflösungen hier tendenziell besser als bei der vorherigen Messung mit verschiedenen Plateaubreiten. Aufgrund der geringeren Statistik und des bekannterweise nicht vollständig korrigierten Effekts der Verzögerung wäre eher eine schlechtere Auflösung zu erwarten gewesen. Es ist somit davon auszugehen, dass in dieser Messung eine bessere Auflösung erzielt worden ist. Dies wird zu einem großen Teil an der besser fixierten Schiene liegen, dadurch fallen einige der systematischen Fehler weg bzw. werden reduziert.

Die starken Geschwindigkeitsschwankungen und die dadurch resultierenden Signalformänderungen führen zu Problemen mit der Auswertesoftware - die für derart große

| A                 | $\mu$ [steps]      | $\sigma$ [steps] | FWHM [steps]     | FWHM [ $\mu\text{m}$ ] |
|-------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------------|
| 157,88 $\pm$ 5,14 | 352,22 $\pm$ 0,10  | 3,46 $\pm$ 0,06  | 8,14 $\pm$ 0,15  | 40,71 $\pm$ 0,76       |
| 130,75 $\pm$ 4,39 | 1649,58 $\pm$ 0,12 | 4,19 $\pm$ 0,08  | 9,87 $\pm$ 0,20  | 49,33 $\pm$ 1,00       |
| 96,30 $\pm$ 3,09  | 3051,45 $\pm$ 0,16 | 5,78 $\pm$ 0,11  | 13,60 $\pm$ 0,25 | 68,01 $\pm$ 1,26       |
| 98,29 $\pm$ 3,34  | 4491,13 $\pm$ 0,15 | 5,57 $\pm$ 0,12  | 13,11 $\pm$ 0,27 | 65,57 $\pm$ 1,37       |
| 73,59 $\pm$ 2,39  | 6132,69 $\pm$ 0,21 | 7,38 $\pm$ 0,14  | 17,37 $\pm$ 0,33 | 86,87 $\pm$ 1,63       |
| 162,60 $\pm$ 5,43 | 8140,99 $\pm$ 0,10 | 3,36 $\pm$ 0,07  | 7,91 $\pm$ 0,16  | 39,55 $\pm$ 0,79       |

Tab. 3.8: Fitparameter der Positionsverteilungen.

Variationen nicht ausgelegt war. Dies äußert sich in vermehrten Ausreißern und führt zu größeren Fehlern in den berechneten Größen. Diese betreffen jedoch primär die Auswertung der Zeiten, die Ortspositionion ist - wie bereits im vorherigen Kapitel gezeigt - nur schwach von der Geschwindigkeit abhängig.

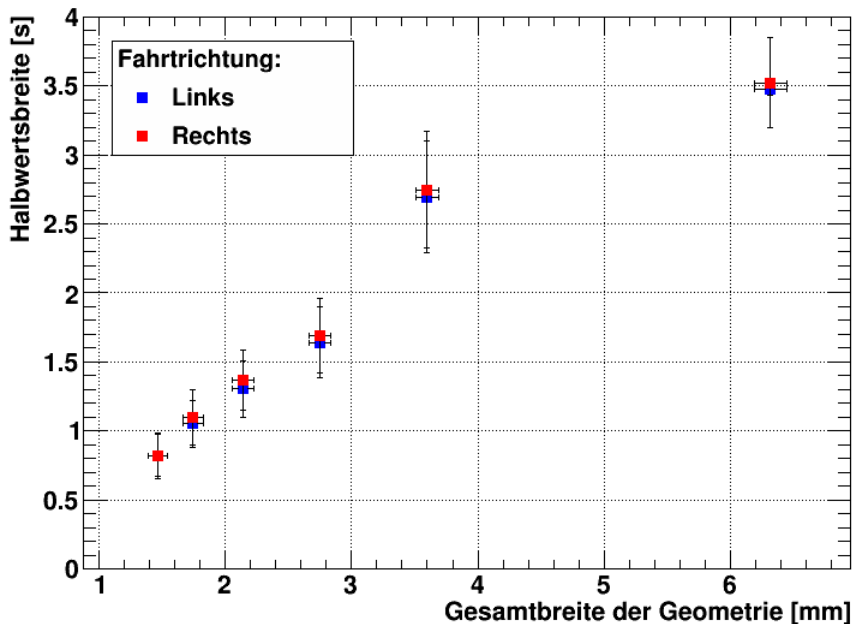
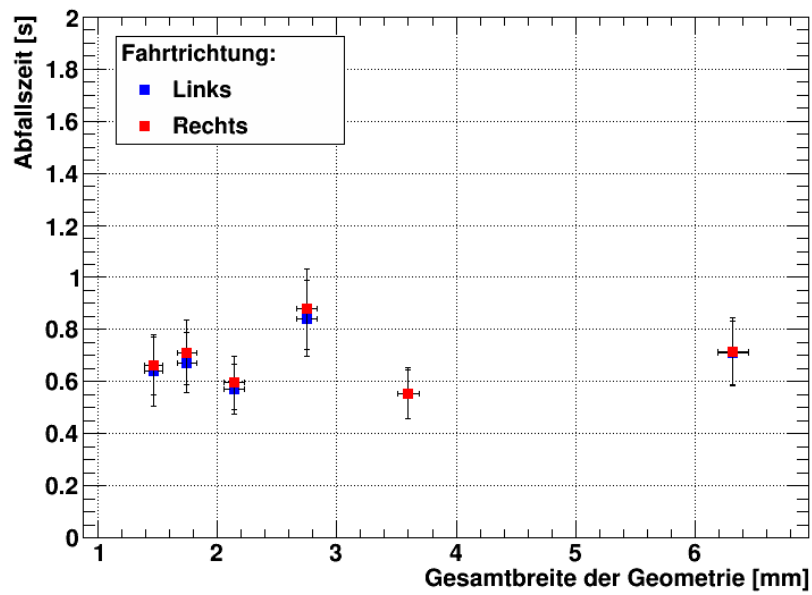
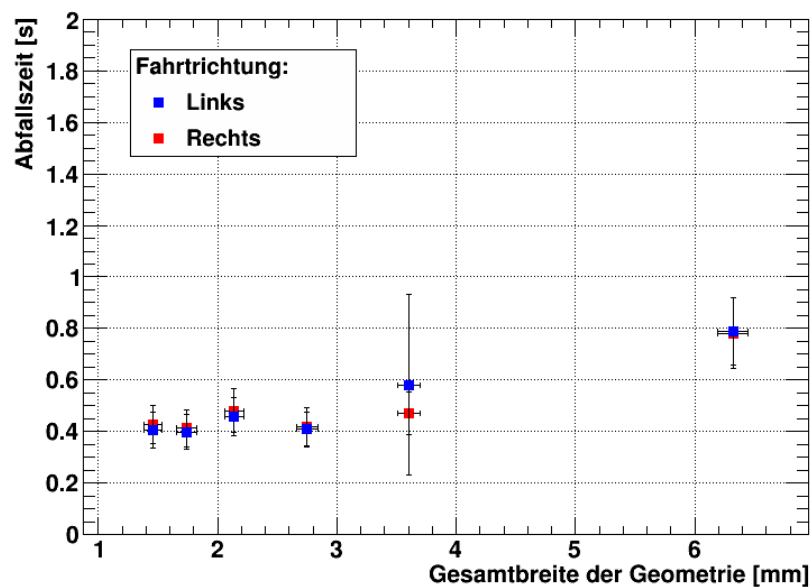


Abb. 3.31: Halbwertsbreite der Geometrien. Auch hier zeigt sich der erwartete lineare Verlauf mit der Breite. Verschiedene Winkel an den Kanten können somit ebenfalls für eine Ortskodierung verwendet werden. Bedingt durch die wesentlich geringere Statistik und die verzerrten Signalförmungen sind die statistischen Fehler größer als in der vorherigen Messung.

Zur Bestimmung der Anstiegs-, Abfallzeiten und Halbwertsbreiten der Signale wird über alle berechneten Zeiten (z.B. Halbwertsbreite) - d.h. für alle verschiedenen Geschwindigkeiten - gemittelt. Es wurde bereits gezeigt, dass sich die Zeiten anti-



(a) Linke Kanten



(b) Rechte Kanten

Abb. 3.32: Anstiegs- bzw. Abfallszeiten der Signale an den Kanten der Geometrien. Es zeigt sich der erwartete, näherungsweise konstante Verlauf. Der große Fehlerbalken bei 3,6 mm entsteht durch eine zu große Variation der Geschwindigkeiten, die das Auswertungsskript derzeit nicht filtern kann.

proportional zur Geschwindigkeit verhalten, folglich ist mit dem Mitteln der Zeiten effektiv ein Mitteln der Geschwindigkeiten durchgeführt worden. Die Abbildungen 3.32b, 3.32a und 3.31 zeigen die gemittelten Zeiten gegen die jeweiligen Breiten der Geometrien. Da die Verzögerung keinen Einfluss auf relative Zeit hat, können für Anstiegs- und Abfallszeit sowie Halbwertsbreite wieder die Daten beide Fahrrichtungen betrachtet werden.

Die Anstiegs-, Abfallzeiten bzw. Halbwertsbreiten zeigen dagegen keine neuen Erkenntnisse. Anstiegszeiten sind weiterhin näherungsweise konstant, während die Halbwertsbreite linear in der Gesamtbreite der Geometrie ansteigt. Wie erwartet sind die Fehlerbalken deutlich größer, der allgemeine Trend verbleibt.

Leider sind die Ergebnisse mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten, da nur geringe Statistik aufgenommen wurde und zudem die Signalformen teils stark verzerrt waren. Weitere Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten und mit besserer Systematik wären erforderlich um die Ergebnisse zu bestätigen.

## 3.8 Einfluss des geteilten Tastkopfes auf die Signalform

Zum Abschluss soll noch der Einfluss des, wie bereits eingangs erwähnt, in zwei Zonen geteilten Tastkopfes untersucht werden. Je nach Ausrichtung der Zonen relativ zur Bewegung des Schlittens könnte dies einen Einfluss auf die Signalformen haben.

Im Fall von senkrechter Ausrichtung des Strahls und perfekt reflektierenden Oberflächen stellt sich die Situation wie folgt dar: In Abbildung 3.33a ist der Strahlverlauf außerhalb einer Geometrie skizziert, unabhängig welche Seite das Licht ausstrahlt ist die Strahlgeometrie dieselbe. In Abb. 3.33b/c ist die Geometrie unter den Tastkopf gewandert. Für beide Anordnungen wird der Strahl an der Flanke der Geometrie vom Tastkopf weg reflektiert. Detektiert werden nur die ebenen Bereiche der Oberfläche. In diesen ist der Strahlengang symmetrisch bezüglich der Mittelachse des Tastkopfes. Weder die Form des Signals, noch die Zeiten, zu denen das Signal sich ändert, sollten sich somit unterscheiden.

Allerdings liegt in den durchgeführten Messungen bekannterweise kein senkrecht orientierter Strahl vor. Zudem wurde bereits gezeigt, dass die Oberfläche diffus und durch Kratzer ungleichmäßig reflektiert. Es wäre daher dennoch ein Einfluss auf die Messung denkbar.

In den meisten durchgeführten Messungen wurde daher die Ausrichtung senkrecht zur Bewegungsachse gewählt, da so beide Zonen gleichzeitig über die Geometrie laufen und sich die Strahlgeometrie je nach Fahrtrichtung nicht ändert. Da keine exakt senkrechte Ausrichtung einstellbar ist, werden dennoch möglicherweise Effekte des asymmetrischen Tastkopfes die Signalformen beeinflussen. Idealerweise sollte für künftige Messungen ein statistisch geteilter Tastkopf verwendet werden, um die beschriebene Problematik zu umgehen.

Für die folgende Untersuchung werden die Daten aus Kapitel 3.4.1 verwendet.



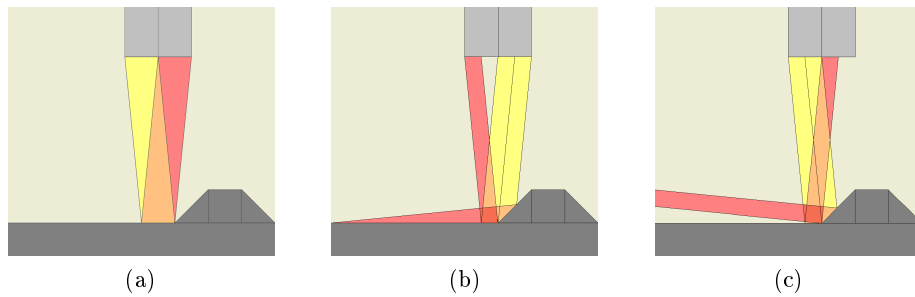


Abb. 3.33: Skizzen zum Strahlengang bei asymmetrischem Tastkopf in paralleler Ausrichtung. Ausgestrahltes Licht ist in gelb dargestellt, reflektiertes in rot.

### 3.8.1 Auswirkung auf die Amplituden der Minima

Bereits in den ersten Messungen fiel auf, dass die Amplituden der Minima nicht symmetrisch sind. In Abbildung 3.34 wird dies noch einmal dargestellt. Die Frage ist, ob dies eine Folge der Oberflächengeometrie oder des asymmetrischen Tastkopfes ist.

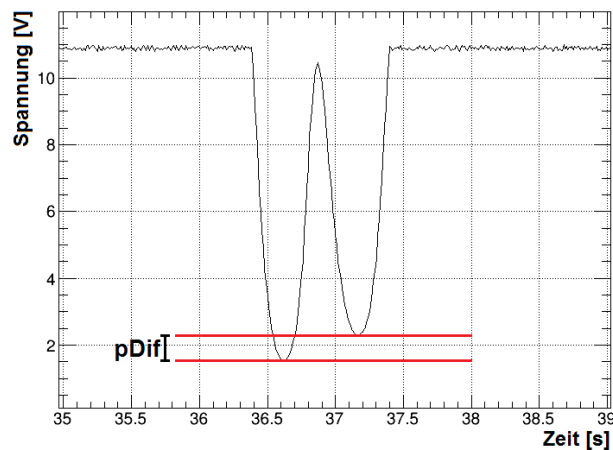
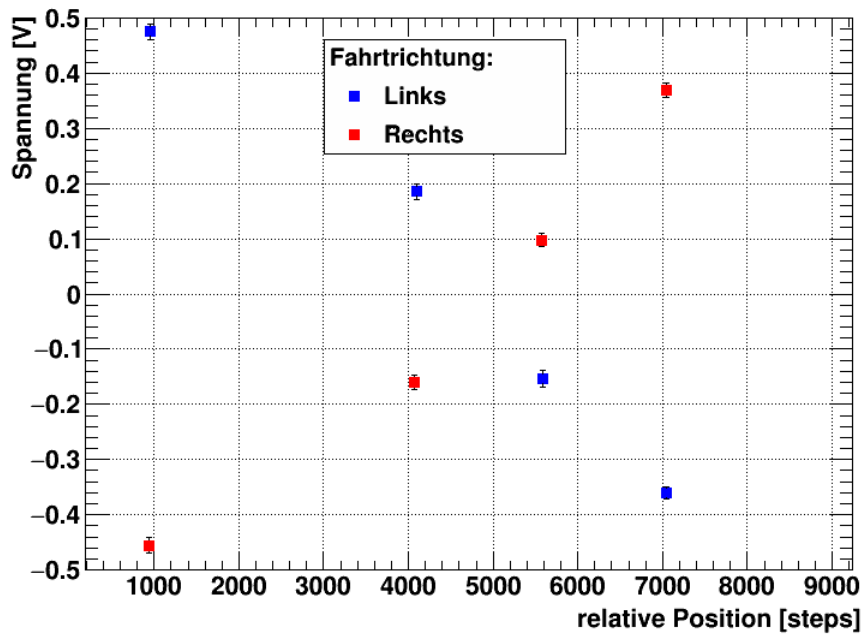
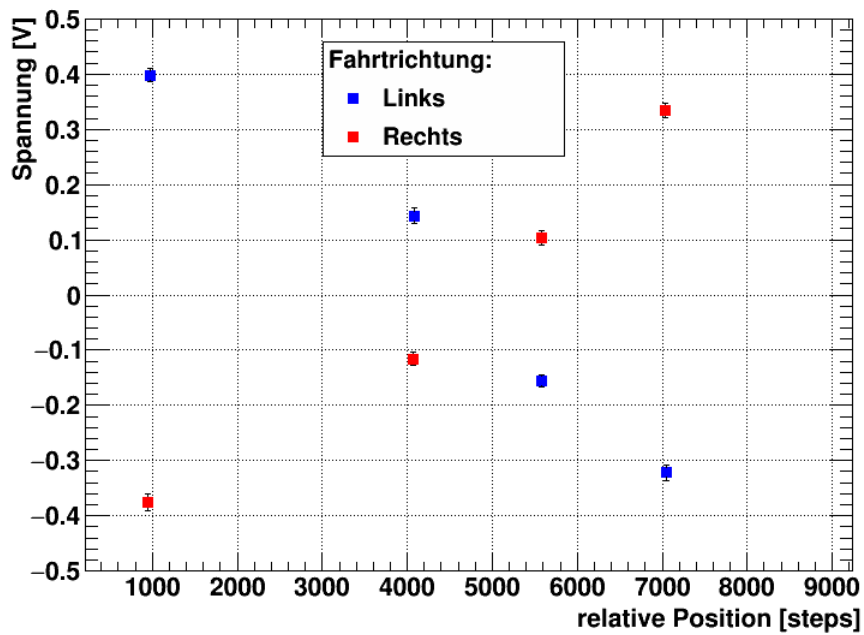


Abb. 3.34: Aufgenommenes Signal mit asymmetrischen Minima. Der markierte Wert pDif kann leicht bei der Datenanalyse mitbestimmt werden und charakterisiert die Asymmetrie der Minima.

Um den Tastkopf als Ursache auszuschließen, werden erneut die Signale mit ROOT untersucht, dass für jede Geometrie die Differenz pDif der Minima, soweit vorhanden, ermittelt. Besteht das Signal nur aus einem einzelnen Minimum, wird die Differenz auf Null gesetzt. Anschließend werden die Differenzen pDif gegen die relativen Positionen der Geometrien in Abbildung 3.35 dargestellt. Ein relativer Winkel von  $0^\circ$  bedeutet in diesem Fall, dass die emittierende Seite des Tastkopfes, bei einer Rechtsbewegung des Schlittens, nach der detektierenden Zone über die Geometrie fährt.



(a) Messung mit senkrechter Tastkopfausrichtung, relativer Winkel  $0^\circ$



(b) Messung mit senkrechter Tastkopfausrichtung, relativer Winkel  $180^\circ$

Abb. 3.35: Vergleich der Amplitudendifferenzen der Minima pDif bei verschiedenen Tastkopfesausrichtungen. Dargestellt sind jeweils Rechts(blau)- und Linksbewegungen (rot) des Schlittens

Ein Vergleich zwischen den Bildern zeigt, dass eine Änderung der Tastkopfausrichtung keinerlei Einfluss auf die Differenzen  $pDif$  hat. Es ist daher davon auszugehen, dass die Amplitudendifferenz eine Konsequenz von Oberflächeneigenschaften ist.

Auch innerhalb des Bildes einer Ausrichtung ist zu sehen, dass eine Richtungsänderung des Schlittens lediglich eine Spiegelung an der x-Achse bewirkt. Die Änderung der Fahrtrichtung bewirkt somit nur eine Spiegelung der Signalform. Effektiv entspricht dies somit auch einer Drehung des Tastkopfes und bestätigt daher weiter die Aussage.

Die minimalen Amplitudenunterschiede liegen vermutlich an unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Lichtwellenleiterbündel. Es ist nicht zu erwarten, dass beide Zonen inklusive der Leiter identische optische Eigenschaften aufweisen. Da bei allen Messungen zur Auflösung die Ausrichtung nicht verändert wurde, spielt dies aber keine weitere Rolle.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein neuer mechanischer Aufbau für das Primärtarget des Hyperkern-Experiments an  $\bar{P}$ ANDA entwickelt. Dieser erfüllt nun alle Anforderungen an die einzuhaltenden Dimensionen und verwendet Motoren mit einem ausreichend langen Fahrweg für einen praktischen Einsatz im Experiment. Zur sicheren Positionierung des Verfahrtes wird ein zuverlässiger Positionssensor benötigt, hierzu war es notwendig einen neuen Sensor für die Positionierung zu entwickeln, der den erwarteten Bedingungen im  $\bar{P}$ ANDA-Detektor standhalten kann. Insbesondere musste ein Weg gefunden werden, die Positionierung strahlenhart zu bewerkstelligen und gleichzeitig eine Präzision von unter  $100\ \mu\text{m}$  zu erreichen.

Es wurde ein vollständiger Prototyp des Aufbaus angefertigt und mittels einer EPICS-Steuerung in Betrieb genommen. Auf diese Weise konnten alle für den späteren Einsatz notwendigen Bewegungen erfolgreich getestet werden.

Der neue Aufbau wurde zudem benutzt um Experimente mit neuen Sensortypen durchzuführen und deren Eignung für die Positionierung des Tisches zu überprüfen. Dabei zeigte sich, dass mechanische Schalter aufgrund der erforderlichen Kraft nicht geeignet sind. Faseroptische Lichttaster dagegen erwiesen sich als geeignetes Sensorsystem. Aufgrund der Bauweise der Sensoren mit Lichtleitern ist keine Elektronik in strahlungsbelasteten Bereichen notwendig. Damit sind die Sensoren prinzipiell strahlenhart, zudem beeinflussen auch Magnetfelder die Funktionsweise nicht.

Unter Verwendung eines geeignet geformten Reflektors (als optische Logikplatte bezeichnet) konnte eine Ortsauflösung von bis zu  $40\ \mu\text{m}$  erreicht werden. Dabei waren die Messungen durch systematische Fehler belastet, die zum größten Teil korrigiert werden konnten. Jedoch beeinflussen mechanische Probleme weiterhin die erreichbare Auflösung. Durch eine Verbesserung der Methodik sollte in Zukunft eine weitere Verbesserung der Auflösung möglich sein.

Es muss jedoch noch eine Möglichkeit gefunden werden, die detektierten Positionen relativ zu den Targets zu justieren. In der bisherigen Form mit einer Logikplatte wäre dies nur über eine Softwarelösung realisierbar, die Möglichkeit einer Grobjustage sollte noch hinzugefügt werden.

Die verwendete Logikplatte wurde durch CNC-Fräsen gefertigt und die dadurch entstandene, stark zerkratzte Oberfläche streut das eingestrahlte Licht stark. Für zukünftige Messungen wäre daher eine Politur der Oberfläche zu empfehlen. Zudem ist die Verwendung von Aluminium als Reflektormaterial zu überdenken, in Tabelle 4.1 sind für verschiedene Metalle die Reflexionskoeffizienten für Infrarotlicht von  $880\ \text{nm}$  aufgelistet. Es zeigt sich, dass Aluminium nicht die optimale Wahl für den Reflektor darstellt, eine Bedampfung der Oberfläche mit Gold könnte das Reflexionsverhalten

potentiell weiter verbessern. Alternativ könnte auch eine Logikplatte gefertigt aus Kupfer ähnliche Ergebnisse liefern.

| Material | Wellenlänge [nm] | Reflexionskoeffizient |
|----------|------------------|-----------------------|
| Al       | 885,6            | 0,8852                |
| Au       | 885,6            | 0,989                 |
| Cu       | 826,5            | 0,965                 |
| Cu       | 1240             | 0,976                 |

Tab. 4.1: Reflexionskoeffizienten verschiedener Metalle im Infrarotbereich. Aluminium ist, im verwendeten Wellenlängenbereich, ein um etwa 10% schlechterer Reflektor als Gold oder Kupfer. [Bas+95, S. 35.29-35.33]. Graphische Darstellungen der Reflexionskoeffizienten finden sich in Anhang B.

Auch eine Kodierung der Position über die Signalformen des Lichttasters erwies sich als prinzipiell möglich. Der Sensor kann die Breiten der Reflektorgeometrien über Zeiten messen. Für eine Umrechnung wird jedoch eine bekannte Geschwindigkeit benötigt. Da derzeit, ohne den laserbasierten Positionssensor, keine Möglichkeit zur Geschwindigkeitsmessung am Primärtargetaufbau besteht, muss eine konstante Fahrgeschwindigkeit gewährleistet werden.

Während der Messungen wurden zudem weitere Informationen zum mechanischen Aufbau gewonnen. So zeigte sich, dass die verwendeten Piezomotoren prinzipiell Strecken von bis zu 10 km überstehen können (weit über den im Experiment notwendigen Fahrbewegungen im Meterbereich), allerdings bereits durch minimal schiefe Montage die Lager des Motors überstrapaziert werden können. Insbesondere die liegende Montage des Motors bereitet hier Probleme, da so minimale Winkeländerungen zwischen Motor und Führungsschiene stets die Motorlager belasten. Eine stehende Montage des Motors ist daher vorzuziehen. Mit dem Wegfallen der mechanischen Schalter wird ausreichend Platz frei, dass eine stehende Montage ohne Probleme möglich wird.

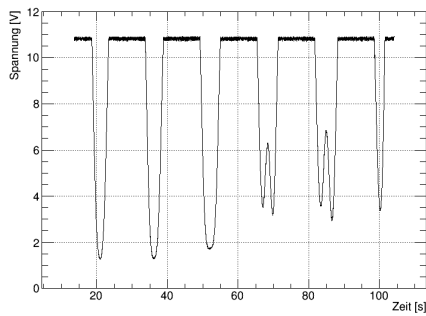
Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Führungsschiene ohne Endanschläge leicht beschädigt werden kann. Auch die Wahl einer Führungsschiene mit nur einem Schlitten muss überdacht werden, da so der Tisch bei seitlichen Belastungen leicht verkantet kann. Die Wahl einer längeren Schiene mit zwei Schlitten liefert hier mehr Stabilität.

Für die Verwendung von Lichttastern/Schranken ist eine weitere Optimierung des Designs erforderlich. Die in dieser Arbeit vorgestellte Entwicklung berücksichtigt den Einsatz von mechanischen Schaltern für die Positionskontrolle in z- und x-Richtung. Bei Verwendung von Lichttastern/Schranken kann nochmals eine deutliche Platzersparnis erreicht werden.

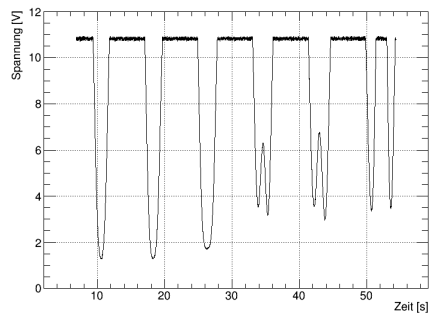
Zusammengefasst erfüllt der vorgestellte Aufbau alle im Vorfeld gestellten Anforderungen. Die faseroptischen Positionssensoren sind bereits in ihrer jetzigen Konfiguration von ihrer Ortsauflösung her, besser als ursprünglich erwartet und liefern eine um Faktor 2,5 bessere Auflösung als für einen Einsatz im Hyperkern-Experiment erforderlich.

# A Messdaten und Ergebnisse

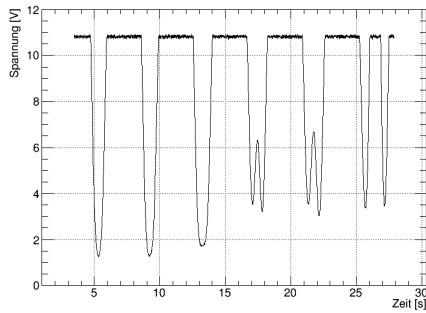
## A.1 Messung mit verschiedenen Geschwindigkeiten



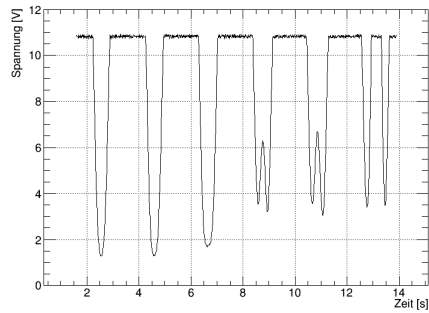
(a)  $v=100$  steps/s



(b)  $v=200$  steps/s



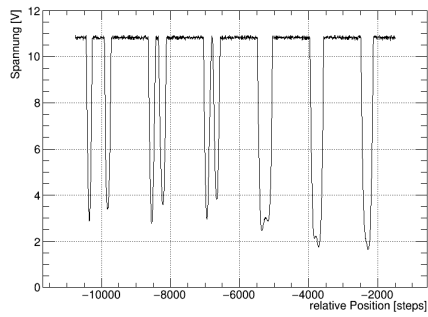
(c)  $v=400$  steps/s



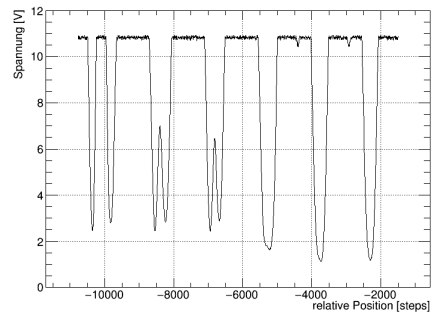
(d)  $v=800$  steps/s

Abb. A.1: Signalverläufe bei verschiedenen Geschwindigkeiten  $v$ .

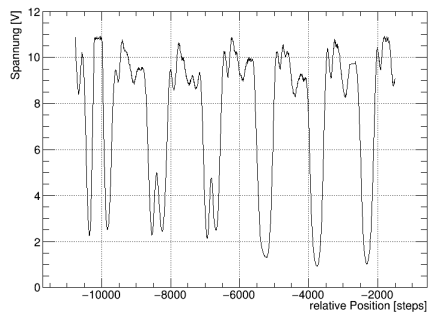
## A.2 Messung mit verschiedenen Tastkopfabständen



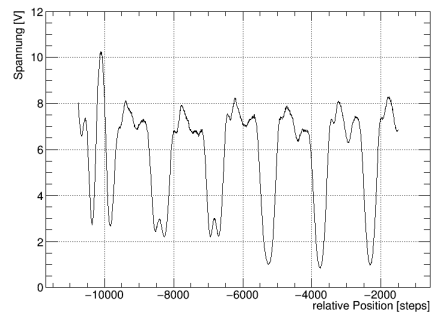
(a)  $d=5\text{ mm}$



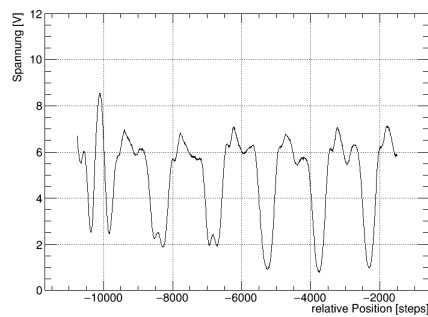
(b)  $d=7\text{ mm}$



(c)  $d=8\text{ mm}$



(d)  $d=9\text{ mm}$



(e)  $d=10\text{ mm}$

Abb. A.2: Signalverläufe bei verschiedenen Tastkopfabständen  $d$ .

### A.3 Untersuchung der Oberflächengeometrien

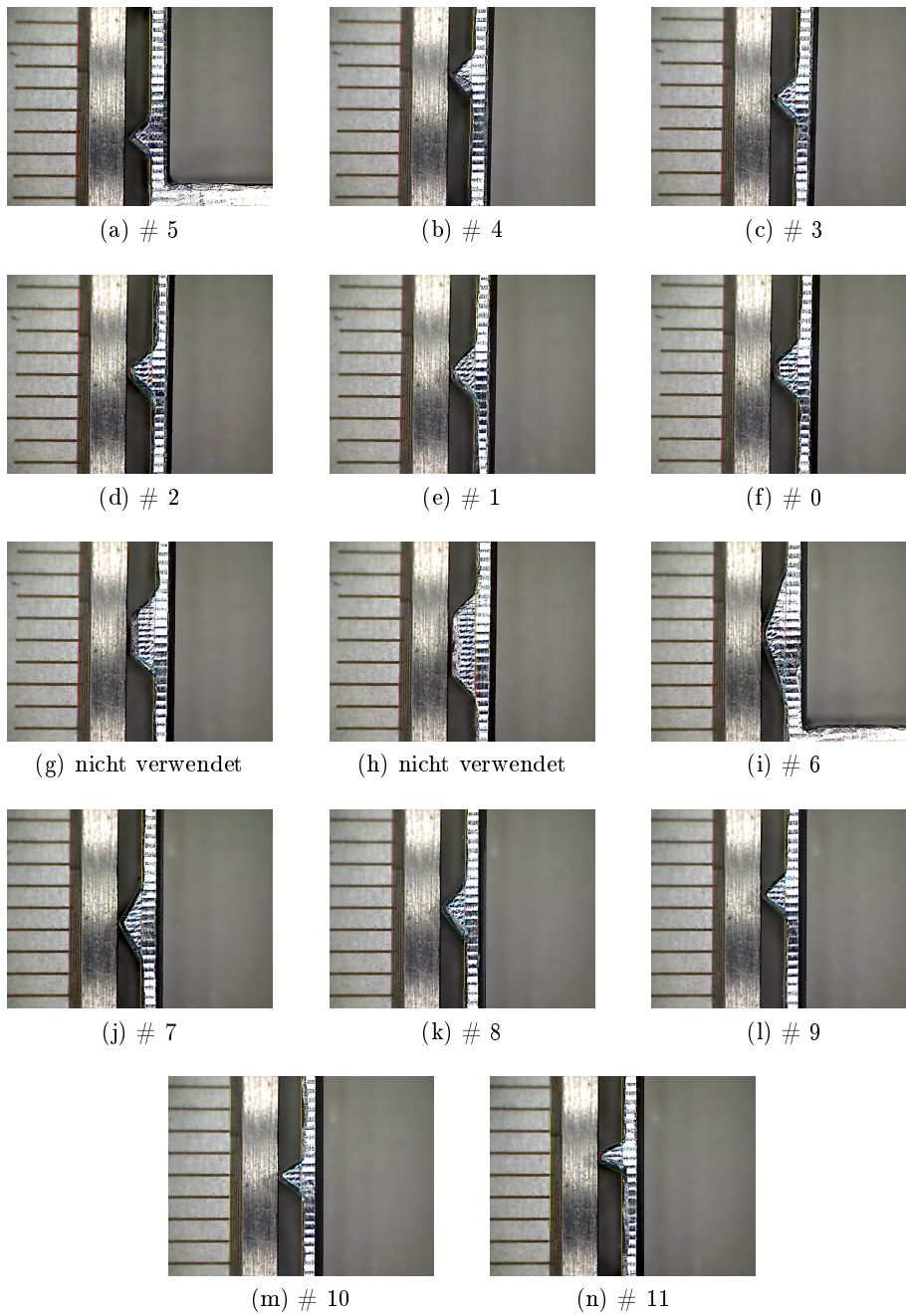
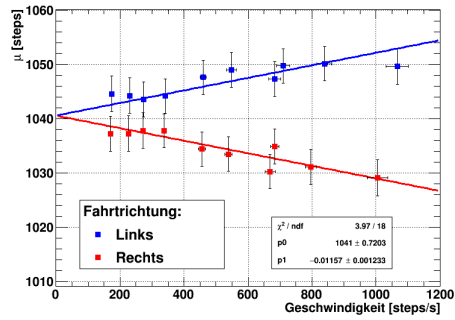


Abb. A.3: Mikroskopaufnahmen der Geometrien, nummeriert nach Tabelle 3.1

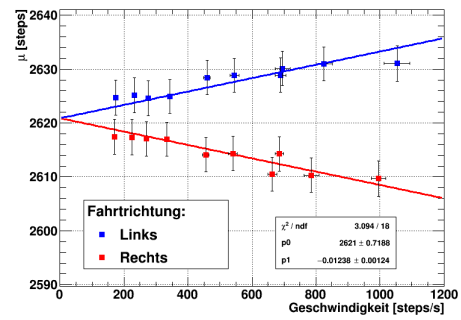


## A.4 Untersuchung der Ortsauflösung

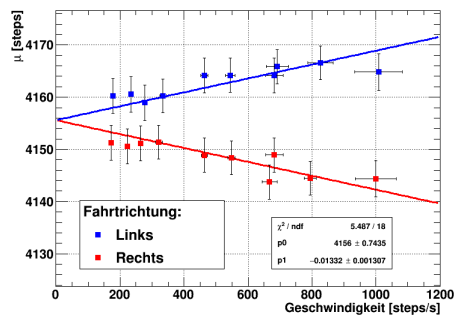
### A.4.1 Berechnung der Mittelwertsverschiebung in den Positionsverteilungen



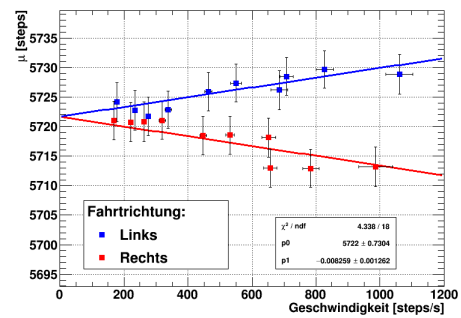
(a)



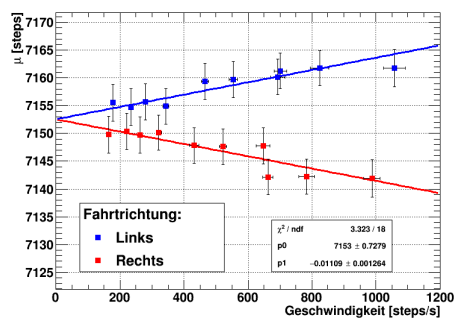
(b)



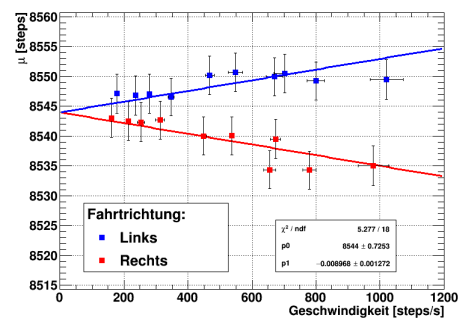
(c)



(d)



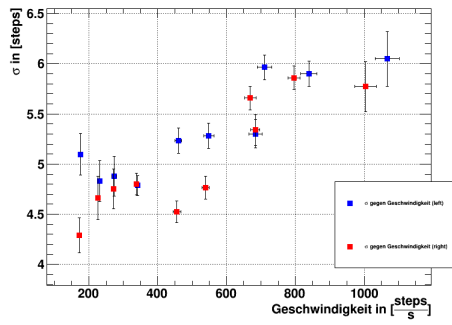
(e)



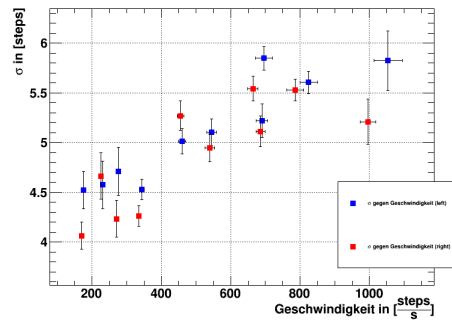
(f)

Abb. A.4: Anpassung der Mittelwerte  $\mu$  gegen die Geschwindigkeit

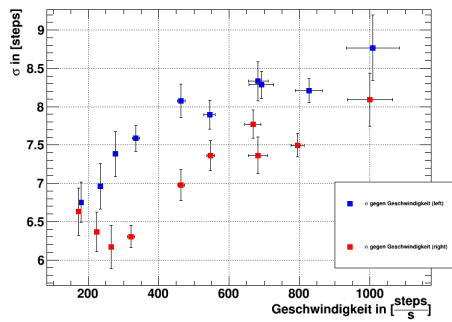
## A.4.2 Geschwindigkeitsabhängigkeit der Breite der Positionsverteilungen



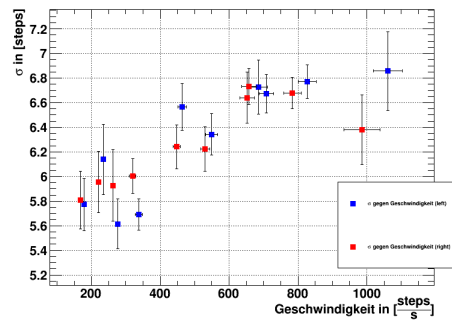
(a)



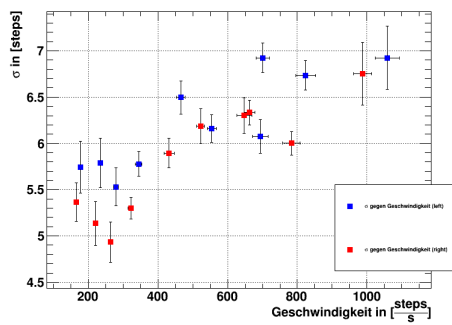
(b)



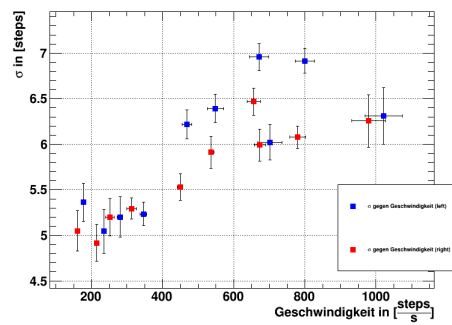
(c)



(d)



(e)



(f)

Abb. A.5: Breiten  $\sigma$  der Positionsverteilungen gegen die Geschwindigkeit

## A.5 Untersuchung der Signalzeiten

### A.5.1 Abfallszeiten

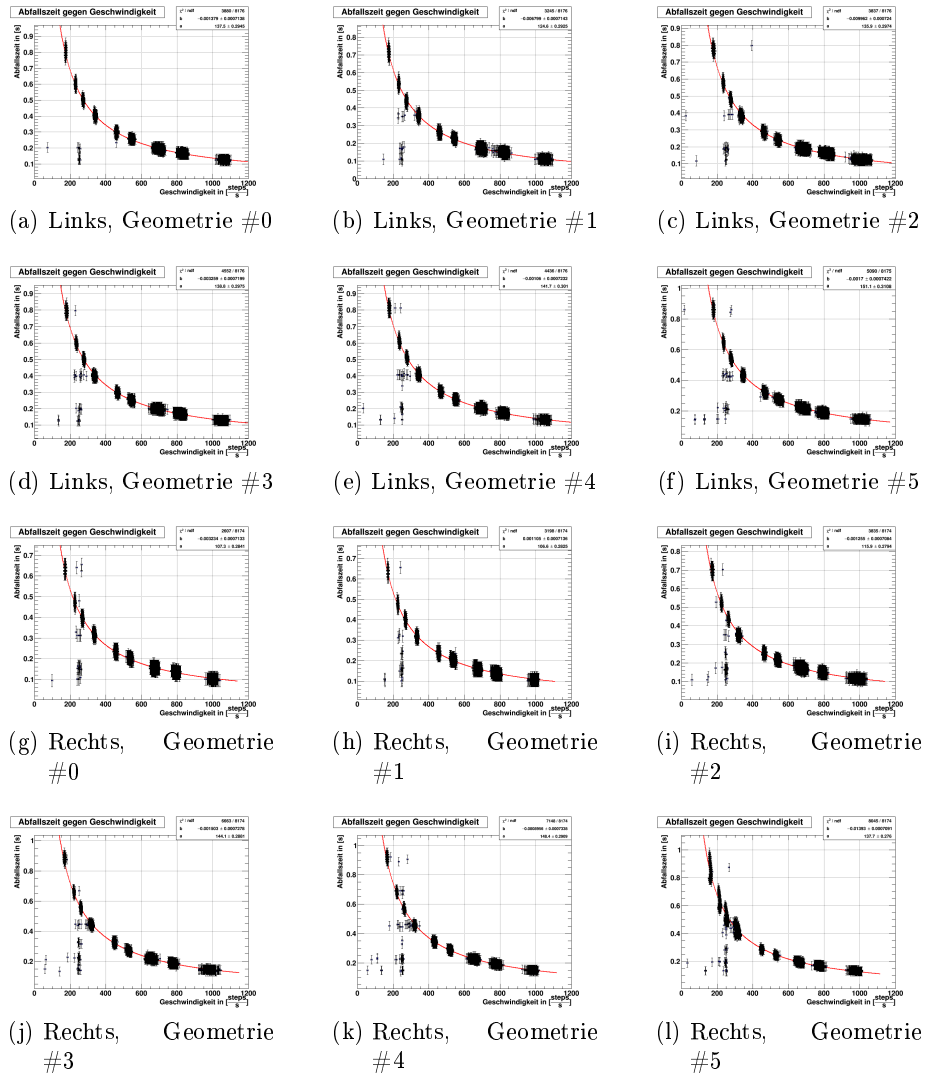
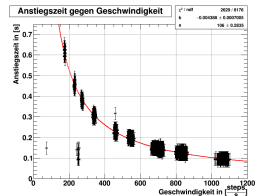
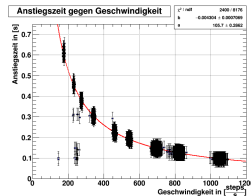


Abb. A.6: Abfallszeiten an verschiedenen Plateaubreiten gegen die Geschwindigkeit bei verschiedenen Fahrrichtungen

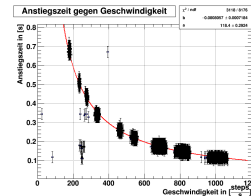
## A.5.2 Anstiegszeiten



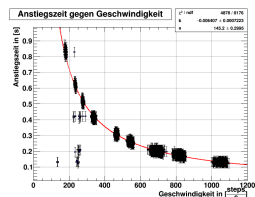
(a) Links, Geometrie #0



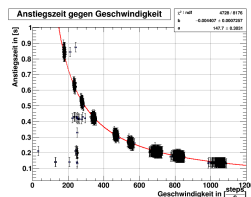
(b) Links, Geometrie #1



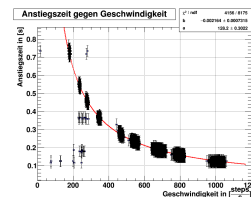
(c) Links, Geometrie #2



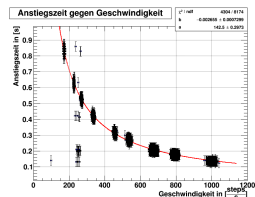
(d) Links, Geometrie #3



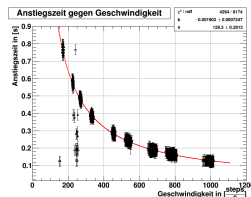
(e) Links, Geometrie #4



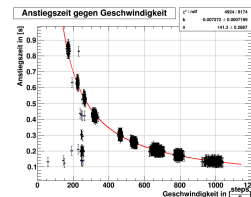
(f) Links, Geometrie #5



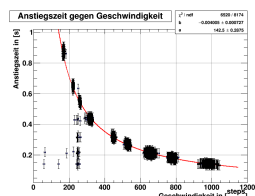
(g) Rechts, Geometrie #0



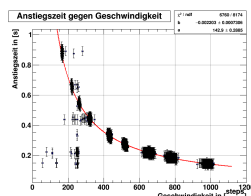
(h) Rechts, Geometrie #1



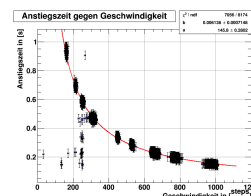
(i) Rechts, Geometrie #2



(j) Rechts, Geometrie #3



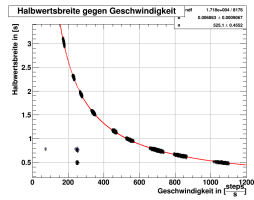
(k) Rechts, Geometrie #4



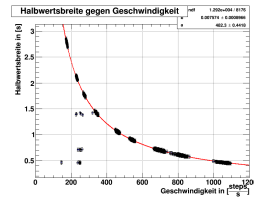
(l) Rechts, Geometrie #5

Abb. A.7: Anstiegszeiten an verschiedenen Plateaubreiten gegen die Geschwindigkeit bei verschiedenen Fahrtrichtungen

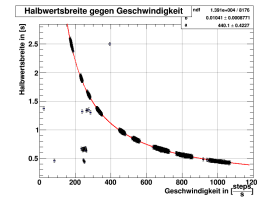
### A.5.3 Halbwertsbreiten



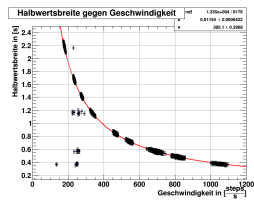
(a) Links, Geometrie #0



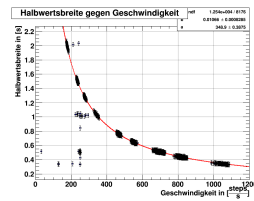
(b) Links, Geometrie #1



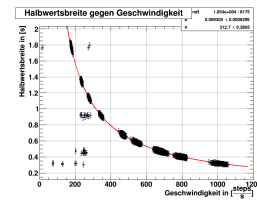
(c) Links, Geometrie #2



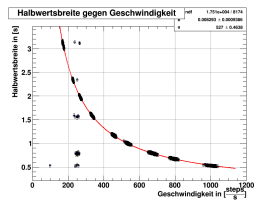
(d) Links, Geometrie #3



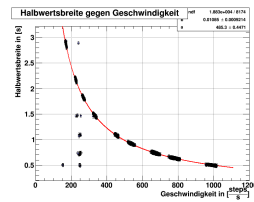
(e) Links, Geometrie #4



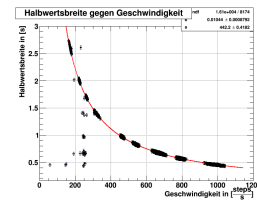
(f) Links, Geometrie #5



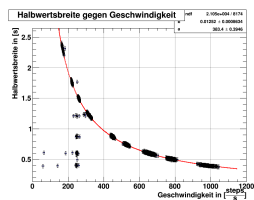
(g) Rechts, Geometrie #0



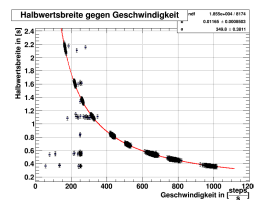
(h) Rechts, Geometrie #1



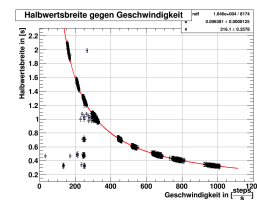
(i) Rechts, Geometrie #2



(j) Rechts, Geometrie #3



(k) Rechts, Geometrie #4



(l) Rechts, Geometrie #5

Abb. A.8: Halbwertsbreiten an verschiedenen Plateubreiten gegen die Geschwindigkeit bei verschiedenen Fahrtrichtungen

## A.6 Geschwindigkeitsschwankung nach Motorschaden

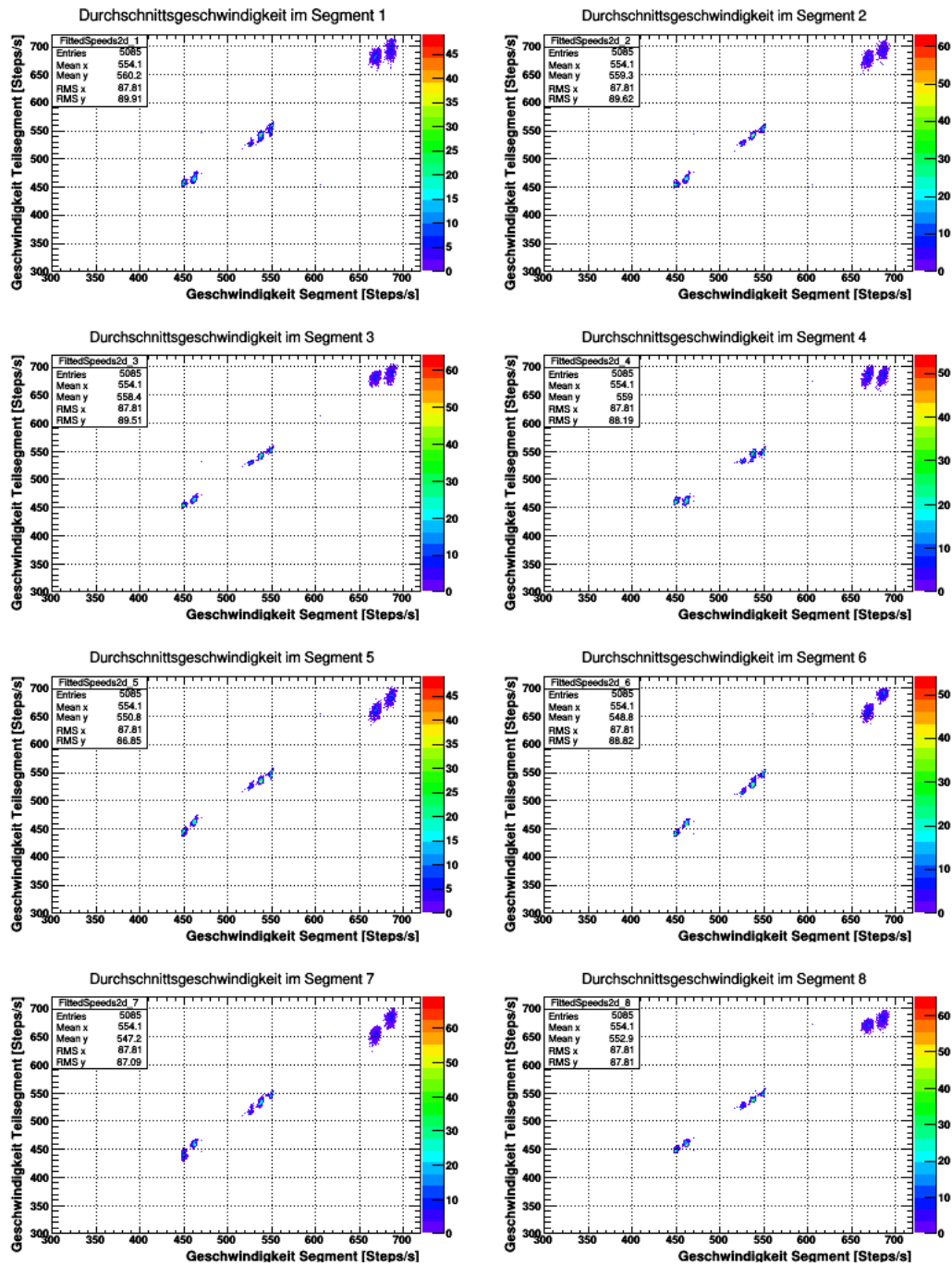


Abb. A.9: Mittlere Geschwindigkeit auf einem Teilsegment (Nummeriert von 1-8) gegen die mittlere Geschwindigkeit auf dem gesamten Segment. Dargestellt ist die Situation vor dem Motorschaden. Zu sehen sind die plötzlich auftretenden Geschwindigkeitssprünge, die bereits in der Auswertung diskutiert wurden. [Boe17]

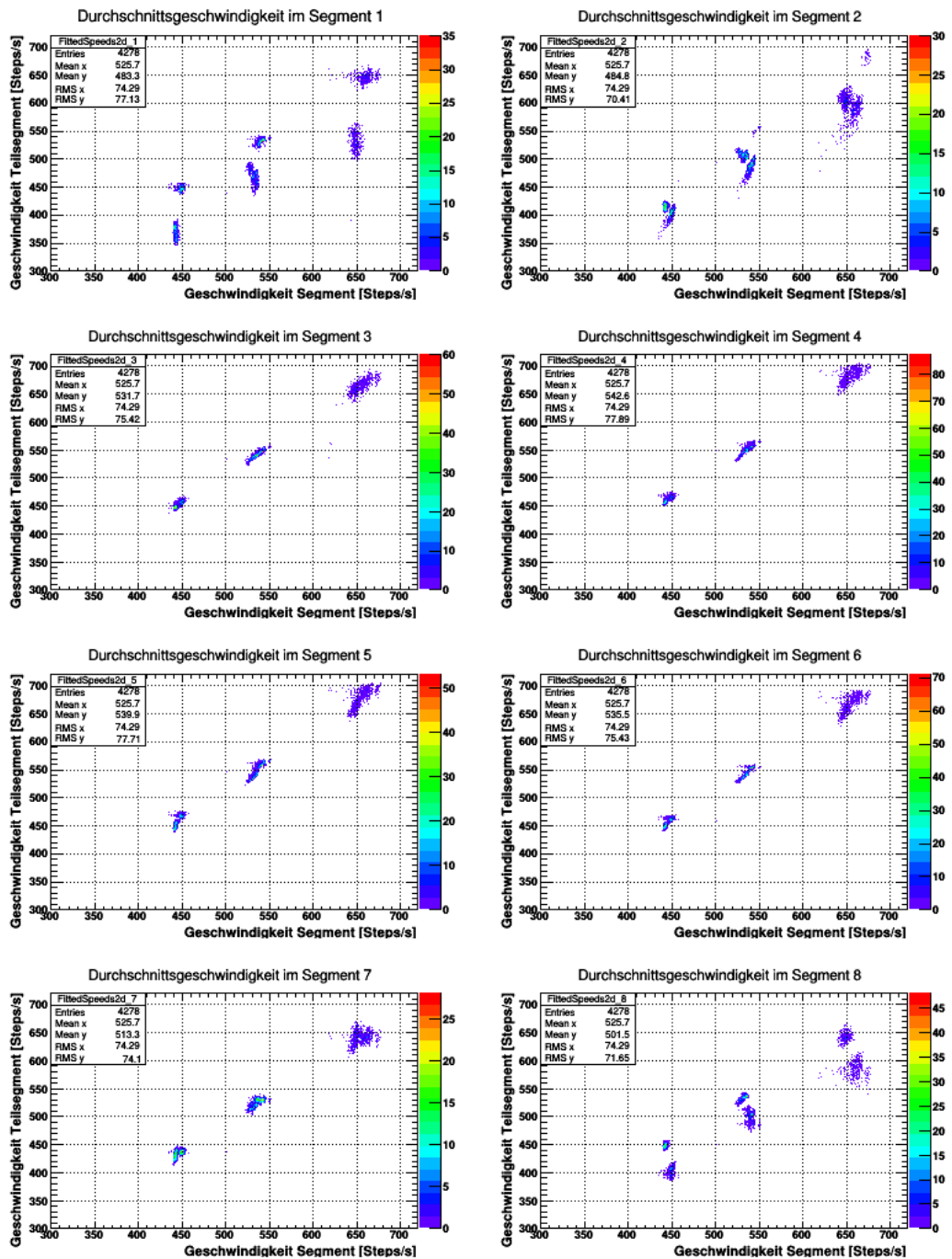


Abb. A.10: Mittlere Geschwindigkeit auf einem Teilsegment (Nummeriert von 1-8) gegen die mittlere Geschwindigkeit auf dem gesamten Segment. Dargestellt ist die Situation nach dem Motorschaden. Zusätzlich zu den Geschwindigkeitssprüngen kommt es, insbesondere an den Randsegmenten 1 bzw. 8, zu einer größeren Streuung der mittleren Geschwindigkeit als ein Anzeichen für eine nicht-konstante Geschwindigkeit. [Boe17]

## B Reflexion

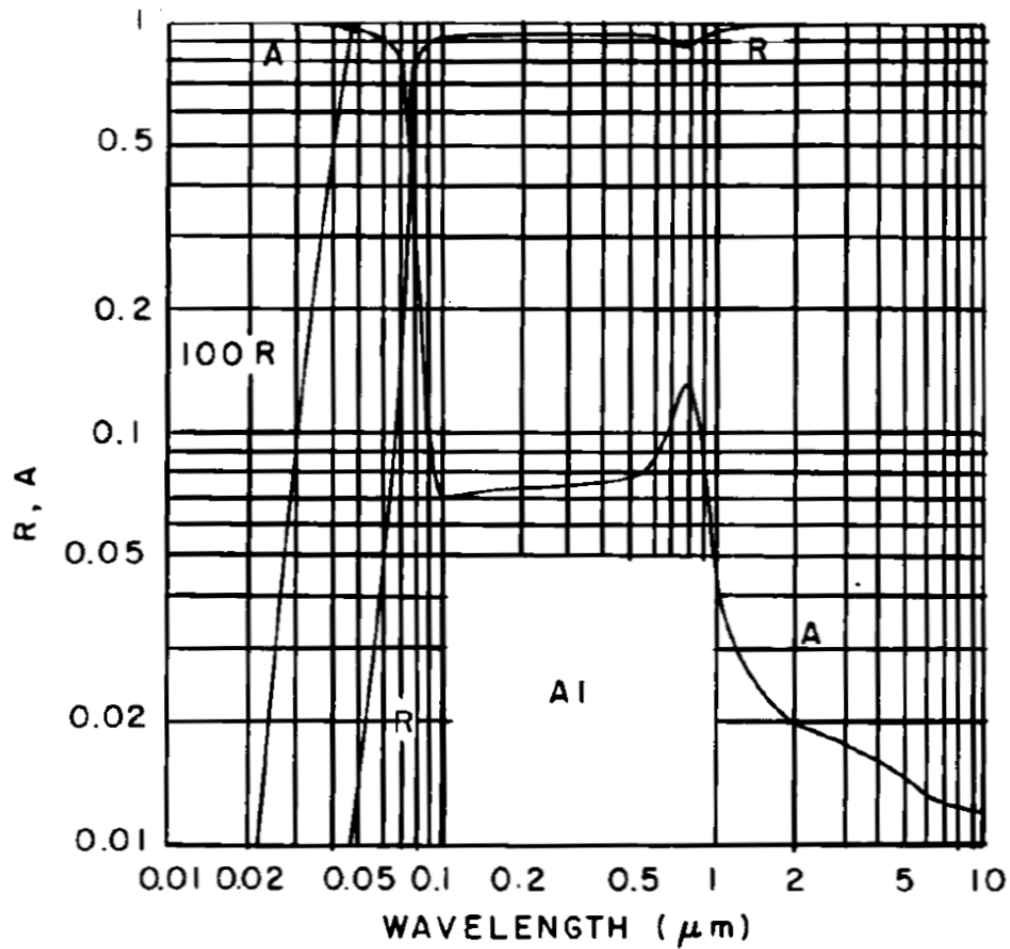


Abb. B.1: Reflexions- und Absorptionskoeffizienten für Aluminium (Al) [Bas+95, S. 35.42]. Man beachte den Verlauf der Reflexion im Bereich von  $1 \mu\text{m}$ , hier hat Aluminium eine verstärkte Absorption bedingt durch die Bandstruktur, dies verursacht einen Abfall des Reflexionskoeffizienten.



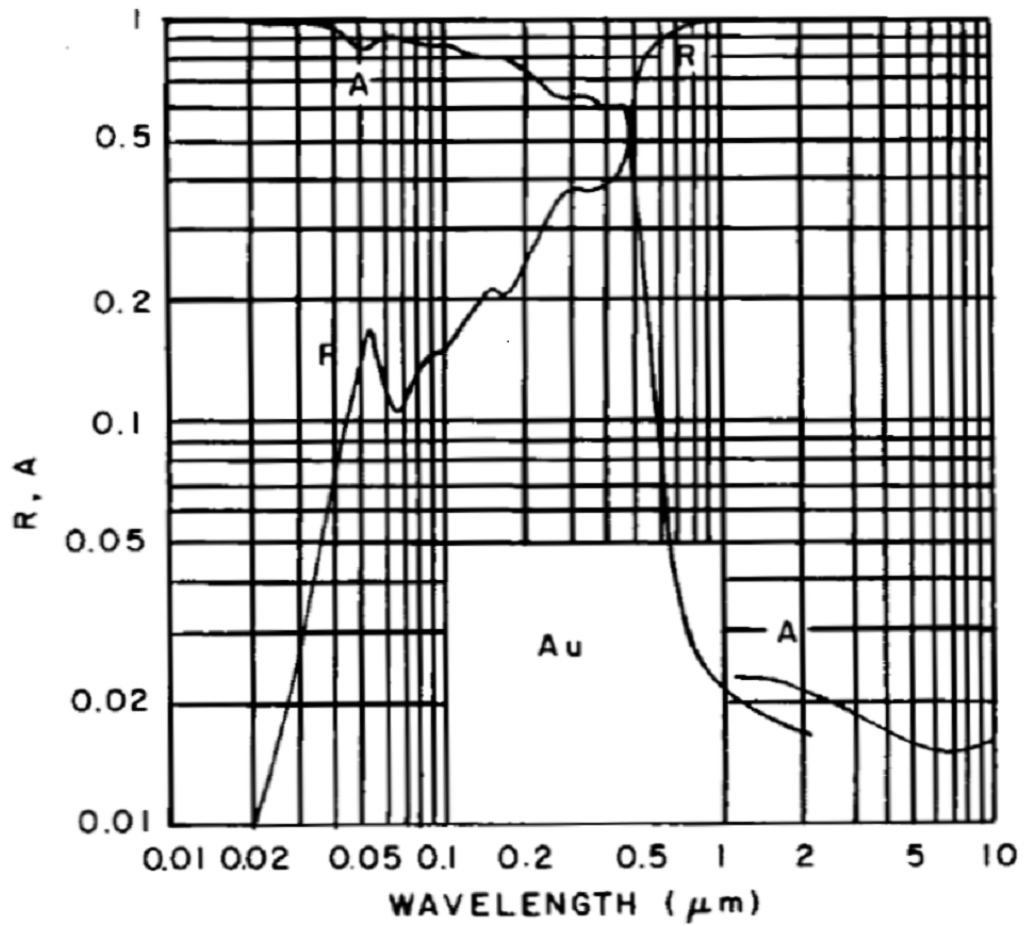


Abb. B.2: Reflexions- und Absorptionskoeffizienten für Gold (Au) [Bas+95, S. 35.43]. Im Gegensatz zu Aluminium weist Gold im Bereich von 880 nm keine plötzliche Änderung des Reflexionskoeffizienten auf. Für die verwendete Wellenlänge ist der Koeffizient besser, siehe Tabelle 4.1 für exakte Werte.

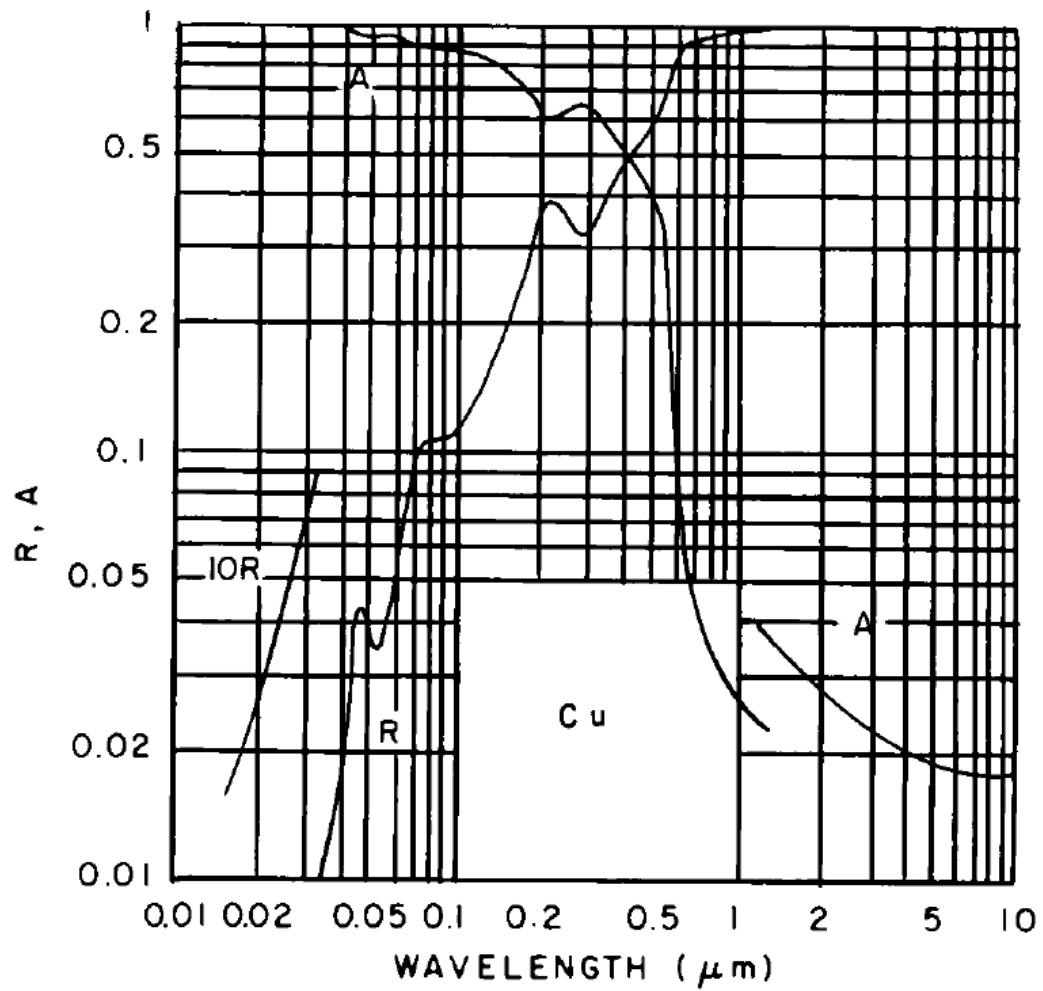


Abb. B.3: Reflexions- und Absorptionskoeffizienten für Kupfer (Cu) [Bas+95, S. 35.42].

## C Technische Zeichnungen

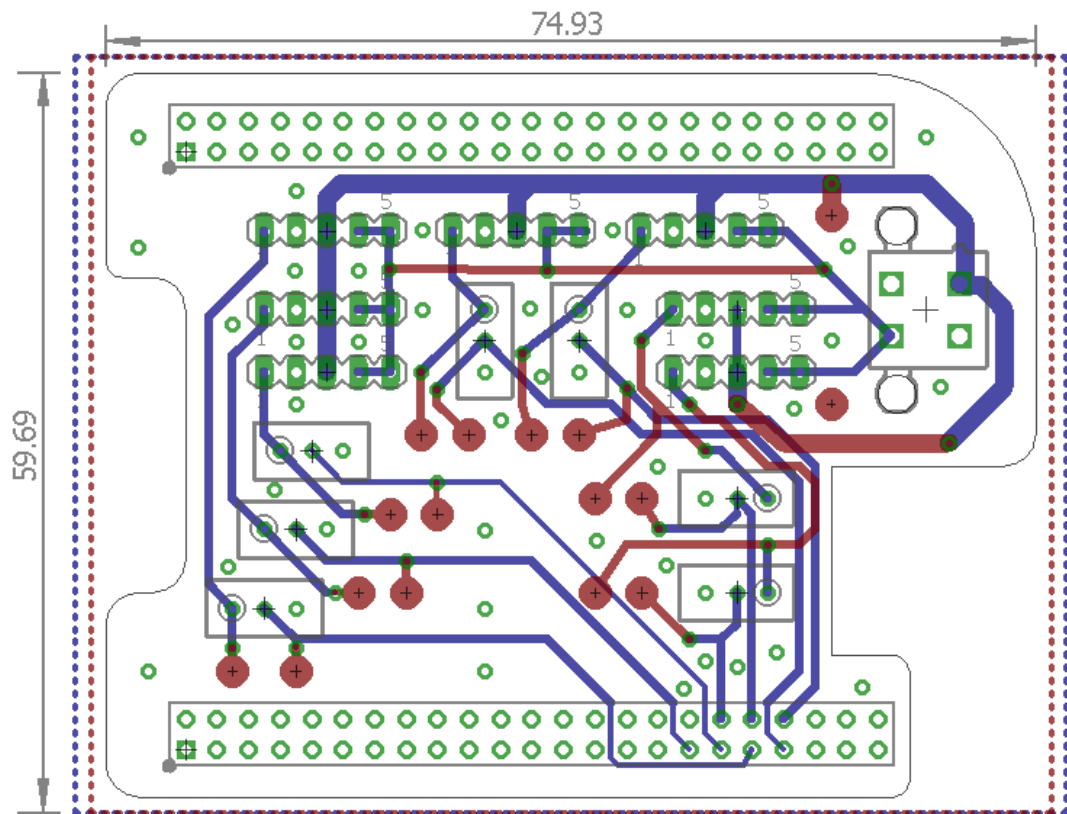


Abb. C.1: Layout der selbstentwickelten Platine

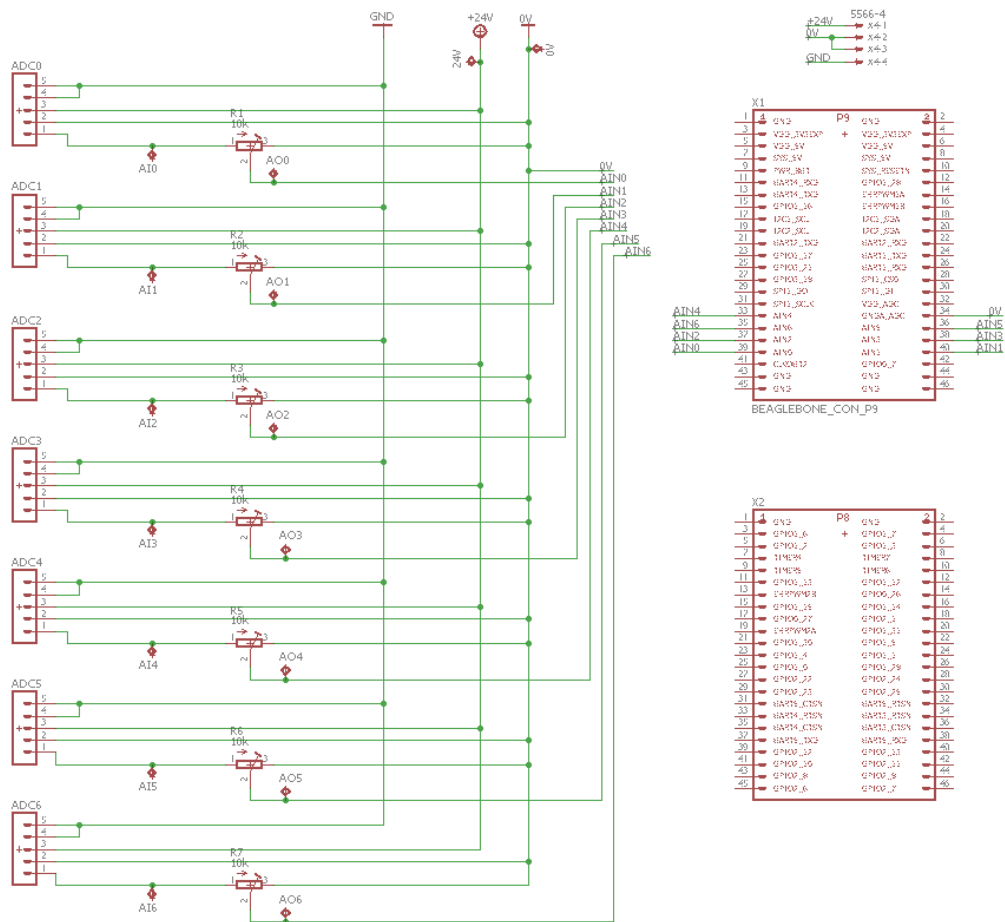


Abb. C.2: Schaltplan der selbstentwickelten Platine

## D Data Sheets



- **Non-magnetic**
- **Vacuum compatible**
- **Direct drive – backlash free**
- **No power draw in hold position**

The LL10 linear motor is intended for a large range of OEM applications with focus on precise positioning in environments that require a completely non-magnetic and/or a vacuum-compatible motor. The direct drive principle of the Piezo LEGS ensures motion without any mechanical play or backlash. Sub-micrometer movement is made easy with this very compact and strong motor. It replaces stepper motor assemblies when there is a need for better resolution and smooth linear movement.

For vacuum compatibility the motor contains components, and is specially prepared, such that outgassing is minimized and that the motor can be baked at temperatures up to 125°C.

The piezoceramic actuators at the core of the motor are inherently non-magnetic and the motor housing and other parts are made from non-magnetic alloys. The magnetic flux density is less than 1 nT (sensor sensitivity in reference measurements) at a distance of 10 mm from the motor housing.

The Piezo LEGS technology is characterized by its outstanding precision and fast response and settling time. Small footprint, low weight, and modest power consumption are other benefits. In combination with the nanometer resolution the technology is quite unique.

The motor is ideally suited for move and hold applications since it is stiff by design and does not consume any power when holding a position. The drive technology is direct, meaning no gears or lead screws are needed to create linear motion. The motor moves by microstepping, dividing a full waveform-step into nanometer size increments. Speed ranges from nanometers per second to millimeters per second, can be seamlessly controlled in the whole dynamic range with no need to alter the driving mode.

### Controlling the motor

We offer a range of drivers and controllers. The PMD301 micro-step controller/driver can be used either as a driver connected to an external motion controller, or as a closed loop controller to handle precise positioning with commands over serial RS485 or USB interface. Multiple units can be chained and controlled over the same serial line. The microstepping feature divides the wfm-step into thousands of small increments which results in nanometer resolution.

The PMD401 board level controller/driver also communicates over RS485 serial interface, and is the most compact solution. For many OEM applications with demand for close integration, this board is the right selection for one or multiple axis of motion.

The most advanced alternative is the DMC-30019 which is a fully featured PID controller with Galil architecture. It can handle speed control and trajectory following, and it has script programming capability with multitasking for concurrent execution of four programs.

Some customers prefer to design their own driver for ease of integration. We provide information to assist in the design.



PMD301



PMD401



DMC-30019

### Summary

#### Motor LL10

D-type Non-Magnetic Vacuum

#### Controller

|              |                               |
|--------------|-------------------------------|
| PMD301-01    | 1-axis controller/driver      |
| PMD401-01B   | 1-axis board level controller |
| DMC-30019-01 | 1-axis Galil controller       |

### Operating Principle

The Piezo LEGS walking principle is of the non-resonant type, i.e. the position of the drive legs is known at any given moment. This assures very good control of the motion over the whole speed range.

The performance of a Piezo LEGS motor is different from that of a DC or stepper motor in several aspects. A Piezo LEGS motor is friction based, meaning the motion is transferred through contact friction between the drive leg and the drive rod. You cannot rely on each step being equal to the next. This is especially true if the motor is operated under varying loads, as shown in the diagram below. For each waveform cycle the Piezo LEGS motor will take one full step, referred to as one *wfm-step* (~7.5 µm at no load with waveform *Rhomb*). In the schematic illustrations to the right, you can see one step being completed. The velocity of the drive rod is *wfm-step* length multiplied with waveform frequency (7.5 µm x 2 kHz = 15 mm/s).

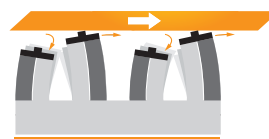
*Micro-stepping* is achieved by dividing the *wfm-step* into discrete points. The resolution will be a combination of the number of points in the waveform, and the load. Example: at 3 N load the typical *wfm-step* length with waveform *Delta* is ~4 µm, and with 8192 discrete points in the waveform the micro-step resolution will be ~0.5 nm.



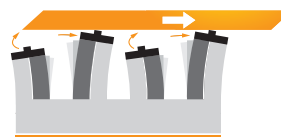
**1** When all four legs are electrically activated they are elongated and bending. As we shall see below, alternate legs move as pairs. Arrows show the direction of motion of the tip of each leg.



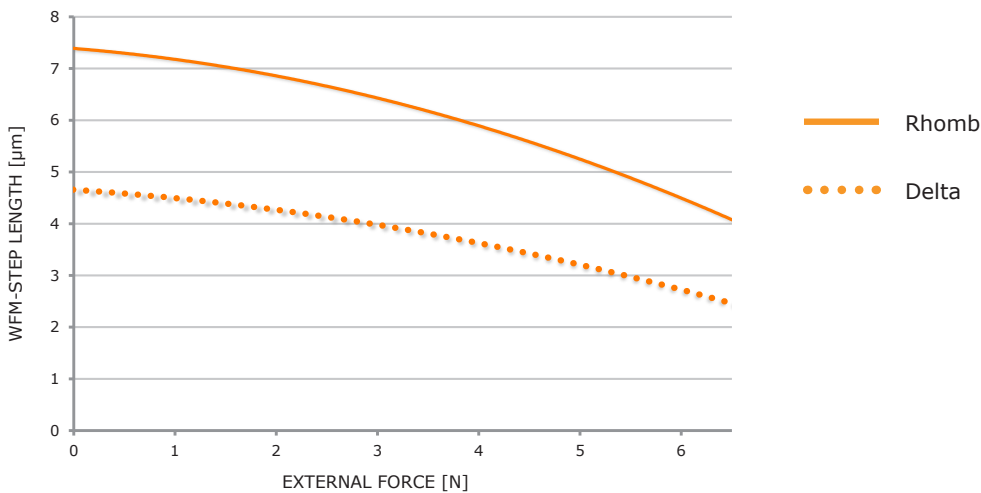
**2** The first pair of legs maintains contact with the rod and moves towards the right. The second pair retracts and their tips begin to move left.



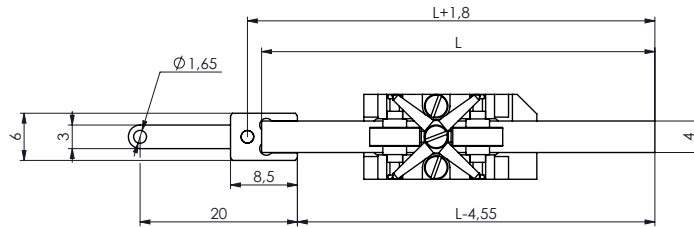
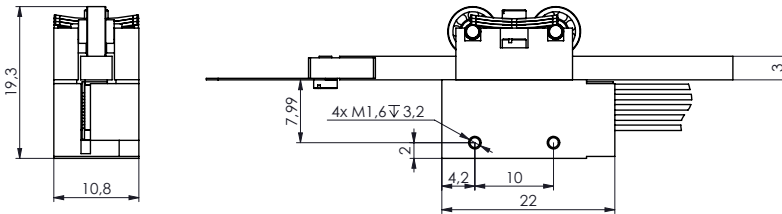
**3** The second pair of legs has now extended and repositioned in contact with the rod. Their tips begin moving right. The first pair retracts and their tips begin to move left.



**4** The second pair of legs has moved right. The first pair begins to elongate and move up towards the rod.



**Figure 1** Motor performance with waveform *Rhomb* (filled) and waveform *Delta* (dotted). *Wfm-step* length is the average distance the drive rod moves when the legs take one *wfm-step* (i.e. for one waveform cycle). Note: Standard deviation  $\sigma$  of 0.5 µm should be taken into account. Typical values are given for 20°C.

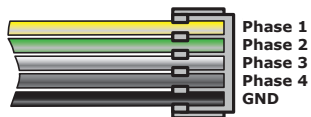
**Main Dimensions LL1011D**  
**Non-magnetic Vacuum**


**Not to Scale**  
**Enlarged for Clarity**

**Note:** Refer to drawings for details.  
 Read *Installation Guidelines* carefully.

**Electrical Connector Type**

Motor has a soldered cable with connector of type JST 05SR-3S.

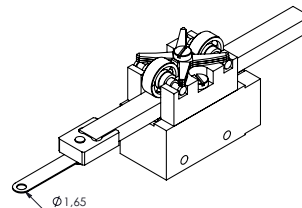


| Motor Wiring |                |
|--------------|----------------|
| Terminal     | Cable Color    |
| Phase 1      | Yellow         |
| Phase 2      | Green          |
| Phase 3      | White          |
| Phase 4      | Grey           |
| Ground (GND) | Black or brown |

**Mounting Instructions**

Fasten motor using 2x M1.6 screws into the threaded M1.6 holes on either side of the motor.

The sheet metal extender of the mechanical adapter will compensate for minor mounting misalignments so that forces and torques are not transferred into the motor. Connect using a M1.6 screw (or similar) inserted into the  $\varnothing 1.65$  mm thru hole of the sheet metal extender.



Please read *Installation Guidelines* carefully for notes on how to properly connect the Piezo LEGS motor. Disregarding the instructions given in the guideline document may impair both motor performance as well as life time.

# Piezo LEGS® Linear 6N

Non-Magnetic Vacuum

150010-07

| Technical Specification        |                                    |       |   |
|--------------------------------|------------------------------------|-------|---|
| Type                           | LL1011D<br>non-magnetic vacuum     | Unit  | Note  |
| Maximum Stroke                 | 80<br>(L-20.8)                     | mm    | 100.8 mm rod,<br>no mechanical adapter            |
| Speed Range <sup>a</sup>       | 0-15                               | mm/s  | no load, depending on waveform and driver         |
| Step Length <sup>b</sup>       | 4                                  | µm    | one wfm-step                                      |
|                                | 0.0005 <sup>c</sup>                | µm    | one micro-step <sup>c</sup>                       |
| Resolution                     | < 1                                | nm    | driver dependent                                  |
| Recommended Operating Range    | 0-3                                | N     | for best micro-stepping performance and life time |
| Stall Force                    | 6.5                                | N     |   |
| Holding Force                  | 7                                  | N     |   |
| Vacuum                         | 10 <sup>-7</sup>                   | torr  |   |
| Maximum Voltage                | 48                                 | V     |   |
| Power Consumption <sup>d</sup> | 5                                  | mW/Hz | =0.5 W at 100 Hz wfm-step frequency               |
| Connector                      | soldered cable<br>with JST 05SR-3S |       |   |
| Mechanical Size                | 22 x 19.3 x 10.8                   | mm    | see drawing for details                           |
| Material in Motor Housing      | Non-Magnetic                       |       |   |
| Weight                         | 23                                 | gram  | approximate                                       |
| Operating Temp.                | -20 to +70                         | °C    |   |

a. Max value is typical for waveform *Rhomb* at 2 kHz, no load, temperature 20°C.

b. Typical values for waveform *Delta*, 3 N load, temperature 20°C.

c. Driver dependent; 8192 micro-steps per wfm-step for driver in the PMD200-series.

d. At temperature 20°C, intermittent runs.

**Note:** All specifications are subject to change without notice.

## Item no. LL1011D-xxx xx xxx

### Family name

LL

### Series

10

### Version

11

### Motor type

D = NMV / Non-Magnetic Vacuum

### Drive rod (standard lengths)

030 = 30 mm      060 = 60 mm  
040 = 40 mm      070 = 70 mm  
050 = 50 mm      101 = 100.8 mm

### Mechanical adapter

A0 = No adapter  
D1 = One adapter - Front

### Connector/Cable

B10 = 1.0 m PTFE AWG28 with JST 05SR-3S connector

Old LL10 motor versions and types may be available on request.

Visit our website for application examples,  
CAD files, videos and more...

[www.piezomotor.com](http://www.piezomotor.com)



PiezoMotor Uppsala AB  
Stålgatan 14  
SE-754 50 Uppsala, Sweden

Telephone: +46 18 489 5000  
Fax: +46 18 489 5001

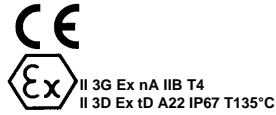
info@piezomotor.com  
www.piezomotor.com





**Optoelektronische Analog-Sensoren IRS/IRN/IRD-2LA(-GD)**

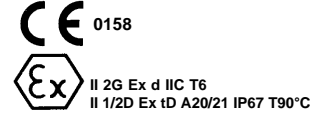
**IRN-2LA/AI-GD**



**Bauform M30**

- Mit analogem Signalausgang, Spannung oder Strom
- Geeignet zum Anschluss von Lichtleitern
- Geeignet zur optischen Abstandserfassung
- Zur Trübungserkennung von Flüssigkeiten
- Zur Positionserfassung
- Typ IRD geeignet zum Einsatz in den Ex Zonen 1+20/21
- Typ IRN geeignet zum Einsatz in den Ex Zonen 2+22

**IRD-2LA/AI-GD**

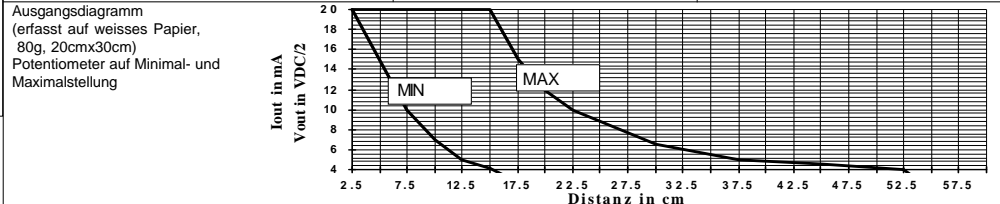
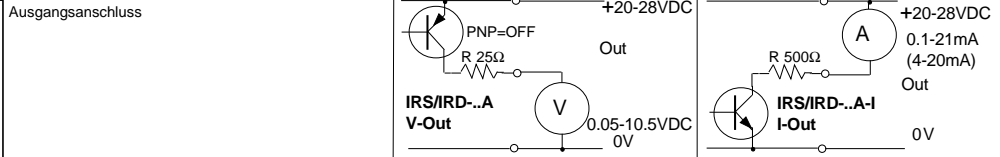
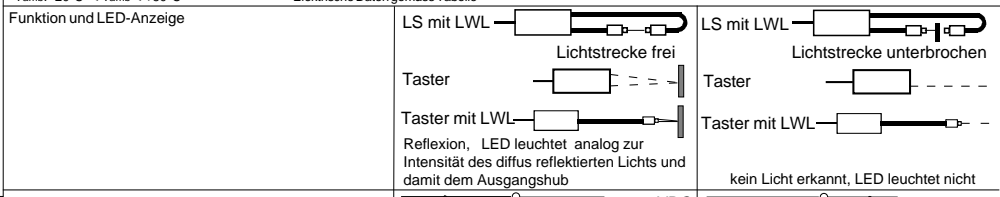


| Technische Daten                             | Typ V-Out<br>Typ I-Out | IRS-U-2LA<br>IRS-U-2LAI  | IRN-2LA-GD<br>IRN-2LAI-GD                      | IRD-2LA-GD<br>IRD-2LAI-GD          |
|--|------------------------|--|--|------------------------------------|
| Zündschutzart Gas, nach 94/9/EG              |                        | keine  | II 3G Ex nA IIB T4                             | II 2G Ex d IIC T6                  |
| Zündschutzart Staub, nach 94/9/EG            |                        | keine  | II 3D Ex tD<br>A22 IP67 T135°C                 | II 1/2D Ex tD<br>A20/21 IP67 T90°C |
| Einsatz in Ex Zonen                          |                        | keine  | 2, 22  | 1, 2, 20/21, 22                    |
| Signalhub, Spannungsausgang                  |                        | 0.05VDC - 10.5VDC (Welligkeit <20mV)   |  |                                    |
| Signalhub, Stromausgang                      |                        | 0.1mA - 21mA (Welligkeit <40uA), (4mA - 20mA optional)   |  |                                    |
| Arbeitsbereich, (einstellbar)                | V-Out                  |  | 5VDC/20cm                                      |                                    |
| (auf weisses Papier 80g, 20cm x 30cm)        | I-Out                  |  | 10mA/20cm                                      |                                    |
| Lichtquelle                                  |                        |  | Infrarot 870nm                                 |                                    |
| Optischer Öffnungswinkel                     |                        |  | ca. 12°  |                                    |
| Reaktionsgeschwindigkeit                     |                        |  | 5ms (IR-2LA S155: 1.5ms)                       |                                    |
| Versorgungsspannung                          |                        |  | 24 VDC (20 bis 28VDC)                          |                                    |
| Stromaufnahme                                |                        |  | max. 60mA                                      |                                    |
| Max. Leistungsaufnahme                       |                        |  | 1.4W   |                                    |
| Spannungsausgang, IR (-U)-2LA                |                        |  | PNP, Ausgangsimpedanz ca.25Ω, RL: 2kΩ bis 1MΩ  |                                    |
| Stromausgang, IR (-U)-2LAI                   |                        |  | NPN, Ausgangsimpedanz ca.500Ω, RL: 0Ω bis 100Ω |                                    |
| Eingang, nur Typen IR...DI (Disable Eingang) |                        |  | PNP kompatibel, Ri 10kΩ                        |                                    |
| Gehäuse                                      |                        |  | M30, Ms 58 vernickelt                          |                                    |
| Schutzart nach EN 60529                      |                        | IP 54  | IP 67  | IP67                               |
| Beständigkeit gegen Vibration und Schock     |                        | Vibration: 30g bei 20Hz bis 2kHz, Schock:50g in jeder Richtung (X, Y, Z)   |  |                                    |
| Arbeitstemperaturbereich                     |                        | -20°C < Tamb < +60°C   | -20°C < Tamb < +50°C                           | -20°C < Tamb < +50°C               |
| Arbeitstemperaturbereich, IRS-U-2LA S176     |                        | -20°C < Tamb < +80°C   | --   | --                                 |
| Arbeitstemperaturbereich, IRS-U-2LA S177     |                        | -20°C < Tamb < +100°C  | --   | --                                 |
| Anschlusskabel, IRN und IRD                  |                        | 3+PE x 0,5mm <sup>2</sup> , geschirmt, TPU, ölbeständig, Länge: 3m   |  |                                    |
| Anschlusskabel Typen IR...DI                 |                        | 4+PE x 0,5mm <sup>2</sup> , geschirmt, TPU, ölbeständig, Länge: 3m   |  |                                    |
| Anschlusskabel, IRS                          |                        | 3+PE x 0,5mm <sup>2</sup> , TPU oder PVC, Länge: 3m  |  |                                    |
| Anschluss IRN... S99                         |                        | Lumberg, M12 Stiftstecker, Typ RSF 5-polig   |  |                                    |
| Zubehör, alle Typen                          |                        | - 2 Muttern M30 (oder auf Anfrage 1 Klemmschelle)  |  |                                    |
| Zubehör, IRN/IRD...GD                        |                        | - 1x Ersatzschraube mit Dichtung zur Potentiometerabdichtung   |  |                                    |
| Zubehör, IRN...GD S99                        |                        | - 1x Sicherungsvorrichtung gegen unbeabsichtigtes Lösen des Steckers, aus Kunststoff (im Beipack)  |  |                                    |
| Zubehör, IRN...GD S99                        |                        | - 1x Warnschild "Nicht unter Spannung trennen" (im Beipack)  |  |                                    |
| Zubehör, IRS-U-2LA S66, im Lieferumfang      |                        | - 1x Kabeldose, 4-polig, Binder Nr. 99-0430-12-04  |  |                                    |
| Optionen                                     |                        | - IR...DI (mit Ausblende-Eingang (Disable)) - IR...A-I4: Sensoren mit Stromausgang 4 - 20mA  |  |                                    |
|  |                        | - IRS/IRN/IRD-2L-X: Ausgangsfunktion durch Schaltsinn durch Polarität der Versorgungsspannung invertierbar   |  |                                    |
|  |                        | - Kabellänge bis maximal 100m - IRN-2LAI-GD S110: Mit Vorsatzoptik DL30 und Planreflektor  |  |                                    |
|  |                        | - IRS/IRN... S99: Stecker M12: Lumberg RSF5 - IRS-U-2LA S133: Stecker Binder 713/4-polig, an Kabel 200mm   |  |                                    |
|  |                        | - IRS-U-2LA S66: Stecker Binder 713/4-polig, an Kabel 200mm, vormontierte Vorsatzoptik DL30, Reichweite bei 5V am Ausgang ca.75cm  |  |                                    |
|  |                        | - IRS/IRN/IRD-2LA-I4 S137: Reduzierte Leistung zur Füllstandsmessung mit dem Lichtleiter Typ SKM-2000-2-T-FG und dem Quarzglasstastkopf QPR-6/320 - IRS/IRN/IRD-2LA S155: Reaktionsgeschwindigkeit = 1.5ms |  |                                    |
|  |                        | - IRS-U-2LA S176: Ta = -20°C bis +80°C, vormontierte Vorsatzoptik DL30, Reichweite bei 5V am Ausgang ca. 75cm  |  |                                    |
|  |                        | - IRS-U-2LA S177: Ta = -20°C bis +100°C, vormontierte Vorsatzoptik DL30, Reichweite bei 5V am Ausgang ca. 75cm   |  |                                    |

ATEX Kennzeichnungen am Sensor:  
 CE0158  
 Gerätetyp: IRD...  
 Gerätetyp: IRN...  
 Tamb: -20°C < Tamb < +50°C

Hersteller mit Anschrift  
 II 2G Ex d IIC T6, II 1/2D Ex tD A20/21 IP67 T90°C  
 II 3G Ex nA IIB T4, II 3D Ex tD A22 IP67 T135°C  
 Elektrische Daten gemäss Tabelle

Produktionsdatum: Ziffern 5 bis 8 der Seriennummer (Jahr/Woche)  
 EG-Baumusterprüfbescheinigung Nr.: DMT 99 ATEX E 056  
 Herstellerdeklaration nach 94/9/EG



IRSN-ANALOG-2LA-GD\_012.2014-06-16/HB

**IR.-2LA-DI (optionaler Ausblende-Eingang)**  
 U<sub>in</sub>: 18V-28VDC, DI=+24V=Inaktiv  
 Reaktionszeit: <=200µs  
 Halizeit: >=10ms, DI=0V=Aktiv

**Abmessungen**  
 Anschlussbelegung  
 IRN/IRD-2LA  
 IRS-U-2LA S176/S177  
 (S176/S177: Zeichnung ohne Vorsatzoptik, Masse Vorsatzoptik: Siehe unten):

|         |   |               |           |
|---------|---|---------------|-----------|
| +24VDC  | 1 | IRN/IRD-..    | 1         |
| 0V      | 2 | IRN/IRD-..-DI | 1         |
| Ausgang | 3 |               | 2         |
| DI      | 4 |               | 3         |
| PE      |   | gelb-grün     | 4         |
|         |   |               | gelb-grün |

**Abmessungen**  
 Anschlussbelegung  
 IRS/IRN-2LA S99:

|           |         |           |              |
|-----------|---------|-----------|--------------|
| 1/braun   | +24VDC  | IR-.. S99 | IR-..-DI S99 |
| 2/weiss   | NC      |           | DI           |
| 3/blau    | 0V      |           | 0V           |
| 4/schwarz | Ausgang |           | Ausgang      |
| 5/grau    | PE      |           | PE           |

**Abmessungen**  
 Anschlussbelegung  
 IRS-U-2LA:

|         |           |           |
|---------|-----------|-----------|
| +24VDC  | IR-..     | IR-..-DI  |
| 0V      | braun     | 1         |
| Ausgang | blau/grau | 2         |
| DI      | schwarz   | 3         |
| PE      | --        | 4         |
|         | gelb-grün | gelb-grün |

**Abmessungen IRS-U-2LA S66 und S133:**  
 IRS-U-2LA S133 ohne Vorsatzoptik

**Sicherstellung des Potenzialausgleichs:**

Kabelende ausserhalb des Ex Bereichs anschliessen.  
 Örtlichen Potenzialausgleich mittels PE-Anschluss korrosionsbeständig sicherstellen.  
 Schirm breitflächig an PE legen

**Montagevorschrift**  
**Ex-Schutz:**  
 Die gültigen Regeln und Einrichtungsrichtlinien bezüglich Ex-Schutz müssen zwingend eingehalten werden (En 60079-14). Der örtliche Potenzialausgleich ist korrosionsbeständig und dauerhaft sicher zu stellen. Der Schutzleiter (PE-Anschluss) ist fest mit dem Gehäuse verbunden. Die maximal zulässige Eingangsspannung U<sub>m</sub> = 30VDC darf nicht überschritten werden. Ausser Originalteilen, dürfen keine zusätzlichen, den Lichtstrahl fokussierende Einrichtungen, zur Anwendung gelangen. Die Kabel müssen so verlegt bzw. geschützt werden, dass sie nicht beschädigt werden können. Das Kabelende muss innerhalb des Ex Bereichs in bescheinigten Ex Dosen oder ausserhalb des Ex Bereichs aufgelegt werden. Muss das Potentiometer eingestellt werden, muss nach der Betätigung des Potentiometers, die Staubschutzschraube, mit unbeschädigtem Dichtung, wieder eingeschraubt werden. In den Zonen 20/21 und 22 dürfen die Sensoren nicht ohne Staubschutzverschraubung betrieben werden. Verlorengelagerte Verschraubungen oder defekte Dichtringe müssen ersetzt werden.  
**Typ: IRD-2LA/AI-GD** darf in den Ex Zonen 1 und 2 zur Anwendung gelangen.  
**Typ: IRN-2LA/AI-GD** darf nur in den Zonen 2 und 22 zur Anwendung gelangen.  
**Typ: IRN-2LA/AI-GD S99** darf nur in den Zonen 2 und 22 zur Anwendung gelangen. Der Stecker darf nur angeschlossen oder gelöst werden, wenn das Anschlusskabel nicht unter Spannung steht. Anlässlich der Installation des Gerätes, muss die beiliegende Trennsicherung montiert und das beiliegende Warnschild "Nicht unter Spannung trennen!" auf die Kabeldose am Anschlusskabel aufgeklebt werden. Nur Anschlusskabel Lumberg RKTs 5-298/xx (gerade) RKWTH 5-298/xx (gewinkelt), 5-polig dürfen zur Anwendung gelangen. Ist die Kabeldose nicht am Stecker angeschlossen, muss die Schutzkappe auf den Stecker aufgesetzt werden.  
**Allgemeine Montagevorschriften:**  
 Die Anschlussbelegung ist unbedingt einzuhalten. Bei Verkürzung oder Verlängerung des Anschlusskabels ist der Schirm kurz anzuschliessen bzw. zu verbinden (Innerhalb des Ex Bereichs in bescheinigten Ex Dosen). Die Abschirmung ist breitflächig mit Schutzterde (PE) zu verbinden. Die Sensorkabel dürfen nicht parallel zu Hochspannungs- und Starkstromkabeln verlegt werden. Die Grenzwerte müssen eingehalten werden.  
**Funktion**  
 Der Analogsensor IRS/IRD-A liefert, abhängig von der Menge des diffus reflektierten Lichts, ein analoges Ausgangssignal von 0-10 VDC oder 0-20mA (optional 4-20mA). Damit können Abstandserfassungen auf definierte Reflektionsflächen realisiert werden. Mit angeschlossenem Lichtleiter (Funktion als Lichtschranke) dient der Sensor auch der Trübungserkennung von Flüssigkeiten. Mittels dem Potentiometer kann der Sensor optimal an die Messbedingungen angepasst werden.  
**Optionaler Ausblende-Eingang, Typenreihe "DI":**  
 Der Disable-Eingang DI dient der schnellen Deaktivierung des Sensors. Werden mehrere Sensoren oder deren Lichtleiter nahe zusammen angeordnet, können sie sich gegenseitig beeinflussen. Mit dem DI-Eingang können die Sensoren schnell aus- und wieder eingeschaltet werden. Die Reaktionszeit beträgt 200µs. Während der Deaktivierung (DI=+24V) hält der Ausgang den zuletzt erkannten Zustand. Liegt der Eingang DI auf 0V oder ist er nicht

**Betriebsanleitung / EG-Konformitätserklärung:**  
 angeschlossen, arbeitet der Sensor. Die Aktivierungszeit (DI=0V) muss min. 10ms betragen.  
**Reichweite**  
 Die nominale Reichweite wird auf weisses Papier A4, 80g bestimmt, bei der der Ausgang 5V / 10mA annimmt. Die Reichweite wird durch die Farbe, die Oberflächenbeschaffenheit und die Form des Messobjekts beeinflusst.  
**Lichtleiter**  
 Zusammen mit einem Lichtleiter aus unserem vielseitigen Programm kann der Sensor für die verschiedensten Funktionen, auch als Lichtschranke, verwendet werden.  
**Wartung**  
 Der Sensor ist wartungsfrei. Bei einer Verschmutzung sind die Lichtdurchlässe, bzw. der Lichtleiter sorgfältig zu reinigen. Es dürfen keine aggressiven Medien verwendet werden. Reparaturen dürfen nur durch den Hersteller ausgeführt werden.  
**Sicherheitshinweise**  
 Wird bei den Geräten IRN-.. S99, die Stecker-Trennsicherung entfernt und das Anschlusskabel angeschlossen oder entfernt, wenn es unter Spannung steht besteht Zündgefahr. Wird das Kabel mit angezogener Buchse nicht am Sensor angeschlossen und die Staubschutzschraube nicht aufgeschraubt und befindet sich das Gerät in einer staubgefährdeten Umgebung, kann die Ablagerung von brennbarem Staub nicht ausgeschlossen werden. Diese Ablagerungen können beim nachträglichen Anschliessen in bestromtem Zustand zu einer Zündung führen. Die Näherungsschalter IRS/IRN/IRD dürfen nicht für den Unfallschutz zur Anwendung gelangen. Im Störfall, kann der Ausgang jeden beliebigen Zustand annehmen. Bei Montage, Betrieb und Unterhalt sind die relevanten EU und nationalen Vorschriften und Richtlinien, besonders bezüglich Explosionsschutz zwingend einzuhalten. Unter anderem sind dies: ATEX118a, EX-RL(BGR104), ElExV, TrbF, TRD, UVV, BetrSichV(ATEX137), Einzel-RL 1999/92/EG.  
 Die Sensoren entsprechen folgenden Bestimmungen:  
 EN 60079-0:2004, EN 60079-1:2004, EN 60079-15:2006-05, EN 60079-28:2007, EN 60241-0:2004, EN 61241-1:2004; EN 60529:2000, EN 60950-1:2006; EN 61000-4-2 to EN 61000-4-6, EN 61000-6-1/-2, EN 61000-6-4; ATEX: 94/9/EG.  
 Maschinennrichtlinie: 2006/42/EG. RoHS: 2011/65/EU. EMV: 2004/108/EG.  
**Allgemeines**  
 Änderungen bleiben vorbehalten. Die Näherungsschalter sind so umweltfreundlich wie möglich gebaut. Sie enthalten keine umweltschädlichen Substanzen und weder Silikon noch silikonhaltige Beimengungen. Irreparable oder nicht mehr gebrauchte Geräte müssen nach den gültigen Vorschriften entsorgt werden.

**EG-Konformitätserklärung**  
 Typ IRD-..: EG Baumusterprüfung. Nr: DMT 99 ATEX E 056  
 Typ IRN-..: Herstellerdeklaration nach 94/9/EG.  
 ATEX Bescheinigung Typ Produktion von Ex Produkten nach der Richtlinie 94/9/EG Bescheinigung Nr.: BVS 12 ATEX ZQS / E118, CE 0158. Die Übereinstimmung der Geräte mit den genannten Richtlinien, Normen und der EU-Baumusterprüfung, sowie die Einhaltung des Qualitätssicherungssystems ISO 9001:2008, mit dem ATEX-Modul "Produktion", bestätigt:

Hans Bracher, Matrix Elektronik AG


IRSNP-ANALOG-2L-GD\_012\_2014-06-16/HB

**Matrix Elektronik AG (Manufacturer)**  
 Kirchweg 24 CH-5420 Ehrendingen  
 Tel.: +41 56 20400-20 Fax -29  
 info@matrix-elektronik.com

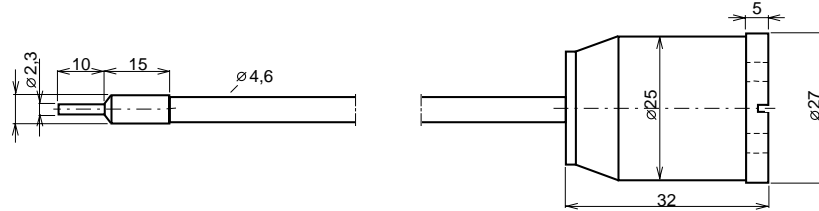
**Tippkemper - Matrix GmbH**  
 Meegener Str. 43 D-51491 Overath  
 Tel.: +49 2206 9566-0 Fax -19  
 info@tippkemper-matrix.com

**Lichtleiter SK-xxxx-1-T-2G3D / SK-xxxx-1-T**

- Ummantelung mit armiertem Silikonkautschuk für Taster-Funktion
- SK-xxxx-1-T-2G3D: Einsatz in den Ex Zonen 1, 2, 22
- SK-xxxx-1-T-90°: Zum Einsatz ausserhalb von Ex Zonen bis TA=+200°C

| Typ  | SK-xxxx-1-T-2G3D  | SK-xxxx-1-T               |
|--|---|---------------------------|
| <b>Technische Daten</b>  | <b>Einsatz in Ex Zonen</b>  | <b>Nicht für Ex Zonen</b> |
| Längen, Standard   | SK-xxxx-1-T(-2G3D) (xxxx=Länge in mm, 200, 500, 1000, 1500, 2000)   |                           |
| Zündschutzart: EN 13463-1:2002: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in Ex Zonen | ja  | nein                      |
| Einsatz in Ex Zonen  | 1, 2, 22  | --                        |
| Gerätegruppe / Einteilung  | II 2G3D IIB T135°C(T4)  | --                        |
| Anforderung an angeschlossene Sensoren   | Begrenzt nach DMT 99 ATEX E056  | keine                     |
| Max. zul. optische Eingangsleistung  | ≤35mW   | nicht begrenzt            |
| Max. mögliche Bestrahlungsstärke   | ≤5mW/mm²  | nicht begrenzt            |
| Aktiver Faserbündeldurchmesser   | 1 mm  |                           |
| Aktiver Faserbündelquerschnitt   | 0.785mm²  |                           |
| Transmission, durchschnittlich   | 50-70%, bei 880nm   |                           |
| Optischer Öffnungswinkel   | ca. 65°, bei 880nm  |                           |
| Einzelfaserdurchmesser   | 50µm  |                           |
| Minimaler Biegeradius  | 30mm (Einzelbiegung)  |                           |
| Zulässiger Temperaturbereich TA  | 0°C < TA < +120°C   | -20°C < TA < +200°C       |
| Schutzart nach EN 60529  | IP 68   |                           |
| Material, Adapter  | Anticorodal 100   |                           |
| Material, Tastköpfe  | Edelstahl, V2A  |                           |
| Material, Schutzmantel   | Silikonkautschuk mit Edelstahl-Armierung  |                           |
| Optionen   | - Andere Längen, auf Anfrage<br>- Reihe SK-xxxx-1-Y-1: Zum Anschluss an Sensoren Serie <b>GF</b>  |                           |
| ATEX Kennzeichnung der Lichtleiter   | CE 0158 Hersteller mit Anschrift<br>Typenbezeichnung: SK-...-2G3D  II 2G3D IIB T135°C(T4)<br>Tech. File Ref: AN_EXLWL<br>TA: 0°C < TA < +120°C Baujahr: Ziffern 4 bis 7 der Fertigungsnummer |                           |

Abmessungen:


**Betriebsanleitung / EG-Konformitätserklärung:**
**Montagevorschrift**
**Ex-Schutz:**

Die Lichtleiter der Serie SK-...-2G3D dürfen nur in den Ex Zonen 1, 2, 22 zur Anwendung gelangen.

Der Lichtleiter darf nur mit ATEX bescheinigten Sensoren DMT 99 ATEX E056 mit maximal 35mW optischer Ausgangsleistung betrieben werden. Der Lichtleiter muss über den angeschlossenen, ATEX bescheinigten Sensor, dauerhaft und korrosionsbeständig geerdet werden. Die gültigen Regeln und Einrichtungsanweisungen bezüglich Ex-Schutz müssen zwingend eingehalten werden. Die maximal zulässige optische Eingangsleistung des Lichtleiters darf nicht überschritten werden. Ausser Originalteilen, dürfen keine fokussierenden optischen Einrichtungen zur Anwendung gelangen. Der Lichtleiter muss so montiert werden, dass er nicht beschädigt wird und keine Reibungswärme entstehen kann. Werden Lichtleiter und zugehöriger Sensor nicht in der gleichen Ex Zone betrieben, muss der Übergang zwischen den Zonen vorschriftsgemäss sichergestellt werden.

**Funktion**

Die Lichtleiter erfüllen die Funktion eines optischen Tasters und können in explosionsgefährlichen Umgebungen, mit bescheinigten Tippkemper-Matrix Sensoren mit 500 bis 950nm, Lichtwellenlänge betrieben werden. Der erreichbare Transmissionsgrad ist auch abhängig von der Anzahl Biegungen und deren Radien.

**Wartung**

Die Lichtleiter sind wartungsfrei. Die optischen Lichtdurchlässe müssen sauber und fettfrei gehalten werden. Durch unzulässig kleine Biege-

radien, können der Schutzschlauch oder die Faserbündel beschädigt werden.

**Allgemeines**

Änderungen bleiben vorbehalten. Der Lichtleiter ist so umweltfreundlich wie möglich gebaut. Irreparable oder nicht mehr gebrauchte Lichtleiter müssen nach den gültigen Vorschriften entsorgt werden.

**Sicherheitshinweise**

Bei Montage, Betrieb und Unterhalt sind die relevanten Vorschriften und Richtlinien, besonders bezüglich Explosionsschutz zwingend einzuhalten. Unter anderem sind dies: ATEX 118a, Ex-RL (BGR104), BetrSichV, Einzel-RL 1999/92/EG.

Die Lichtleiter entsprechen folgenden Bestimmungen:

- EN 13463-1:2002, EN 13463-1 Berichtigung 1:2003
- IEC 60079-28 Ed.1.0 CDV; EN 60529:2000
- Ex-Schutz, 94/9/EG (ATEX 100a)
- Maschinenrichtlinie, 98/37/EG
- RoHS, 2002/95/EG
- Tech. File Ref: AN\_EXLWL

**Bescheinigung/Konformitätserklärung**

Bescheinigung SK-...-2G3D:

Herstellerbescheinigung Nr: AN\_EXLWL nach 94/9/EG.  
 ATEX Bescheinigung Typ Produktion von Ex Produkten nach der Richtlinie 94/9/EG Bescheinigung Nr. BVS 03 ATEX ZQS / E118. Die Übereinstimmung der Lichtleiter mit den genannten Richtlinien, Normen und der EU-Baumusterprüfung, sowie die Einhaltung des Qualitätssicherungssystems ISO 9001:2000, mit dem ATEX-Modul "Produktion", bestätigt:

Hans Bracher, Matrix Elektronik AG

SK-xxxx-1-T-2g3d\_d1/AUG.16.2007/HB

**Matrix Elektronik AG (Manufacturer)**

 Kirchweg 24 CH-5420 Ehrendingen  
 Tel.:+41 56 20400-20 Fax -29

**Tippkemper - Matrix GmbH**

 Meegener Str. 43 D-51491 Overath  
 Tel.:+49 2206 9566-0 Fax -19

## E Bibliographie

- [Abb+16] B. P. Abbott u. a. „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger“. In: *Phys. Rev. Lett.* 116 (6 Feb. 2016), S. 061102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- [Abe+10] „Observation of an Antimatter Hypernucleus“. In: *Science* 328.5974 (2010). Hrsg. von B. I. Abelev u. a., S. 58–62. ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1183980. eprint: <http://science.sciencemag.org/content/328/5974/58.full.pdf>. URL: <http://science.sciencemag.org/content/328/5974/58>.
- [Ant+13] John Antoniadis u. a. „A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary“. In: *Science* 340.6131 (2013). ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.1233232. eprint: <http://science.sciencemag.org/content/340/6131/1233232.full.pdf>. URL: <http://science.sciencemag.org/content/340/6131/1233232>.
- [Bas+95] Michael Bass u. a., Hrsg. *Handbook of optics: Devices, Measurements, & Properties; 2nd Edition, Volume 2*. McGraw-Hill, Inc., 1995. ISBN: 0-07-047974-7.
- [BDE81] A.M. Bernstein, T.W. Donnelly und G.N. Epstein. „Production of hypernuclei by the ( $\gamma$ , K) reaction“. In: *Nuclear Physics A* 358 (1981), S. 195–202. ISSN: 0375-9474. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)90317-1](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474(81)90317-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375947481903171>.
- [BFG99] C. J. Batty, E. Friedman und A. Gal. „Experiments with  $\Xi^-$  atoms“. In: *Phys. Rev. C* 59 (1 Jan. 1999), S. 295–304. DOI: 10.1103/PhysRevC.59.295. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.59.295>.
- [Ble17] Sebastian Bleser. „The target system for the hypernuclear experiment at PANDA“. Diss. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2017. Im Erscheinen.
- [Boe17] Michael Boelting. „Design, Realisierung und Test der Steuersoftware für das primäre Target des PANDA-Hyperkernexperiments“. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2017. Im Erscheinen.

- 
- [Bom16] Ignazio Bombaci. „The Hyperon Puzzle in Neutron Stars“. In: *12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP 2015) Sendai, Japan, September 7-12, 2015*. 2016. arXiv: 1601.05339 [nucl-th]. URL: <https://inspirehep.net/record/1416160/files/arXiv:1601.05339.pdf>.
- [Coh85] Joseph Cohen. „(e, e'K+) reaction on nuclei“. In: *Physics Letters B* 153.6 (1985), S. 367–371. ISSN: 0370-2693. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0370-2693\(85\)90474-5](http://dx.doi.org/10.1016/0370-2693(85)90474-5). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0370269385904745>.
- [col12] NUSTAR collaboration. *NUSTAR Progress Report*. 2012. URL: [http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/experiments/NUSTAR/Pdf/NUSTAR\\_ProgressReport\\_SC\\_Nov2012\\_final.pdf](http://www.fair-center.eu/fileadmin/fair/experiments/NUSTAR/Pdf/NUSTAR_ProgressReport_SC_Nov2012_final.pdf).
- [col16] EPICS collaboration. *Experimental Physics and Industrial Control System*. 2016. URL: [www.aps.anl.gov/epics/index.php](http://www.aps.anl.gov/epics/index.php) (besucht am 17.02.2017).
- [Dem+10] P. B. Demorest u. a. „A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay“. In: *Nature* 467.7319 (Okt. 2010), S. 1081–1083. ISSN: 0028-0836. DOI: 10.1038/nature09466. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature09466>.
- [DLW80] C. B. Dover, L. Ludeking und G. E. Walker. „Hypernuclear physics with pions“. In: *Phys. Rev. C* 22 (5 Nov. 1980), S. 2073–2093. DOI: 10.1103/PhysRevC.22.2073. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.22.2073>.
- [Ern+13] W. Erni u. a. „Technical design report for the PANDA (AntiProton Anihilations at Darmstadt) Straw Tube Tracker“. In: *Eur. Phys. J. A* 49 (2013), S. 25. DOI: 10.1140/epja/i2013-13025-8. arXiv: 1205.5441 [physics.ins-det].
- [Ern+17] W. Erni u. a. „Technical Design Report for the PANDA Luminosity Detector“. In: (2017).
- [Fou] BeagleBoard.org Foundation. *Beagle Bone Black*. URL: [http://beagleboard.org/static/images/black\\_hardware\\_details.png](http://beagleboard.org/static/images/black_hardware_details.png) (besucht am 23.03.2017).
- [FST16] Volker Friese, Christian Sturm und Alberica Toia, Hrsg. *CBM Progress Report 2015*. Literaturang. Darmstadt: GSI, 2016, 155 S. : Ill., graf. Darst. ISBN: 978-3-9815227-3-0. URL: <https://repository.gsi.de/record/186952>.
- [GG09] FAIR GmbH und GSI. *[MSV] Green Paper, The Modularized Start Version : FAIR - Facility for Antiproton and Ion Research*. Darmstadt: FAIR, 2009, 19p. URL: <http://repository.gsi.de/record/54094>.

- 
- [HC83] Shian S. Hsiao und Stephen R. Cotanch. „Hypernuclear excitation through kaon photoproduction“. In: *Phys. Rev. C* 28 (4 Okt. 1983), S. 1668–1678. DOI: 10.1103/PhysRevC.28.1668. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.28.1668>.
- [ion17] ion42. *FAIR: Teilchen für die Forschung*. 2017. URL: <https://www.bmbf.de/de/fair-teilchen-fuer-die-forschung-3313.html> (besucht am 20.01.2017).
- [Mer06] H. Merkel. *Hintergrundbild vom Hyp2006 Poster*. 2006. URL: <http://www1.kph.uni-mainz.de/Hyp2006/chart3.gif> (besucht am 29.03.2017).
- [Nak10] K. Nakazawa. „Double- $\Lambda$  Hypernuclei via the  $\Xi^-$  Hyperon Capture at Rest Reaction in a Hybrid Emulsion“. In: *Nuclear Physics A* 835.1 (2010), S. 207–214. ISSN: 0375-9474. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2010.01.195>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947410001983>.
- [PAN+12] PANDA Collaboration u. a. „Technical Design Report for the: PANDA Micro Vertex Detector“. In: *ArXiv e-prints* (Juli 2012). arXiv: 1207.6581 [physics.ins-det].
- [Pat+16] C. Patrignani u. a. „Review of Particle Physics“. In: *Chin. Phys.* C40.10 (2016), S. 100001. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [Pie16a] PiezoMotor. *Piezo Piezo LEGS<sup>®</sup> Linear 6N Non-Magnetic Vacuum*. 2016. URL: [http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150010\\_LL10.pdf](http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150010_LL10.pdf) (besucht am 20.03.2017).
- [Pie16b] PiezoMotor. *PiezoMotor Microstep Driver 101*. 2016. URL: [http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150080\\_PMD101.pdf](http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150080_PMD101.pdf) (besucht am 20.03.2017).
- [Poh+13] Randolph Pohl u. a. „Muonic Hydrogen and the Proton Radius Puzzle“. In: *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 63.1 (2013), S. 175–204. DOI: 10.1146/annurev-nucl-102212-170627. eprint: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-nucl-102212-170627>. URL: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-nucl-102212-170627>.
- [Psa08] Dimitrios Psaltis. „Probes and Tests of Strong-Field Gravity with Observations in the Electromagnetic Spectrum“. In: *Living Reviews in Relativity* 11.1 (2008), S. 9. ISSN: 1433-8351. DOI: 10.12942/lrr-2008-9. URL: <http://dx.doi.org/10.12942/lrr-2008-9>.
- [Roj16] Marta Martínez Rojo. „Design, construction and test of the primary target system for  $\bar{P}$ ANDA“. Masterarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2016.
- [San10] Alicia Sanchez Lorente. „Feasibility study of performing high precision gamma spectroscopy of  $\Lambda\Lambda$  hypernuclei in the  $\bar{P}$ ANDA experiment“. Diss. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2010.

- 
- [Sin+16] B. Singh u. a. „Study of doubly strange systems using stored antiprotons“. In: *Nuclear Physics A* 954 (2016). Recent Progress in Strangeness and Charm Hadronic and Nuclear Physics, S. 323–340. ISSN: 0375-9474. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2016.05.014>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947416301282>.
- [Ste17] Marcell Steinen. „The germanium detector array for the hypernuclear experiment at PANDA“. Diss. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2017. Im Erscheinen.
- [Stö+15] Th Stöhlker u. a. „APPA at FAIR: From fundamental to applied research“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 365, Part B (2015). Swift Heavy Ions in Matter, 18 - 21 May, 2015, Darmstadt, Germany, S. 680–685. ISSN: 0168-583X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.077>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X15006552>.
- [Tak+01] H. Takahashi u. a. „Observation of a  ${}^6_{\Lambda\Lambda}He$  Double Hypernucleus“. In: *Phys. Rev. Lett.* 87 (21 Nov. 2001), S. 212502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.212502. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.87.212502>.
- [Tan+06] K. Tanida u. a. *Proposal for J-PARC 50 GeV Proton Synchrotron - Measurement of X Rays from  $\Xi^-$  Atom*. 2006. URL: [https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac\\_0606/pdf/p03-Tanida.pdf](https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_0606/pdf/p03-Tanida.pdf) (besucht am 20.03.2017).
- [Tie17] Christian Tiefenthaler. Bachelorarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2017. Im Erscheinen.
- [Tra07] Trassiorf. *Baryonen Oktett*. 2007. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baryon-octet.svg> (besucht am 16.03.2017).

# F Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Die FAIR-Einrichtung . . . . .   | 2  |
| 1.2  | Aufbau des $\bar{P}$ ANDA-Detektors . . . . .  | 5  |
| 1.3  | Das Baryonen-Oktett für $J = 1/2$ . . . . .  | 6  |
| 1.4  | Erweiterte Nuklidkarte der Hyperkerne . . . . .  | 7  |
| 1.5  | Das Nagara-Event . . . . .   | 8  |
| 1.6  | Skizze des Hyperkern-Termschemas . . . . .   | 9  |
| 1.7  | Schematische Darstellung der Erzeugung von Doppel- $\Lambda$ -Hyperkerne an $\bar{P}$ ANDA . . . . . | 10 |
| 1.8  | Aufbau des Hyperkern-Experiment im $\bar{P}$ ANDA-Detektor . . . . .                                 | 12 |
| 1.9  | Temperatur des Primärtargets nach Reaktionsraten . . . . .   | 13 |
| 1.10 | Luminosität des HESR während Hyperkern-Messungen . . . . .   | 14 |
| 1.11 | Berechnete Primärtargetposition für konstante Reaktionsraten . . . . .                               | 15 |
| 1.12 | Schemazeichnung des Hyperkern-Targetsystems . . . . .  | 16 |
| 1.13 | Ein Modul des Germanium-Detektors . . . . .  | 17 |
|      |  |    |
| 2.1  | CAD-Modell der ursprünglichen Prototypen . . . . .   | 20 |
| 2.2  | Der Piezo LEGS <sup>®</sup> . . . . .  | 22 |
| 2.3  | Funktionsprinzip des Piezo LEGS <sup>®</sup> . . . . .   | 22 |
| 2.4  | Reaktion des Piezo LEGS <sup>®</sup> auf externe Kräfte . . . . .                                    | 23 |
| 2.5  | Steuerelektronik PMD101 des Piezo LEGS <sup>®</sup> . . . . .  | 24 |
| 2.6  | Laserbasierter Positionssensor Mercury 1000 . . . . .  | 25 |
| 2.7  | Optisches Gitter des laserbasierten Positionssensor . . . . .  | 25 |
| 2.8  | Prototyp der Motorenhalterung . . . . .  | 29 |
| 2.9  | Der erste Prototyp des mechanischen Aufbaus . . . . .  | 31 |
| 2.10 | Zeichnung des ersten Prototypens (Seitenansicht) . . . . .   | 31 |
| 2.11 | Prototyp des Motoradapters . . . . .   | 33 |
| 2.12 | Prototyp der Schlittenbasis . . . . .  | 34 |
| 2.13 | Prototyp der Schlittenabdeckung . . . . .  | 35 |
| 2.14 | Zeichnung der rückwärtigen Ansicht des zweiten Prototypens . . . . .                                 | 36 |
| 2.15 | Prototyp der mechanischen Logikplatte . . . . .  | 37 |
| 2.16 | CAD-Modell des zweiten Prototypens . . . . .   | 38 |
| 2.17 | Zeichnung des zweiten Prototypens (Seitenansicht) . . . . .  | 39 |
| 2.18 | Polyethylen-Prototyp aus 3D-Druck . . . . .  | 40 |
| 2.19 | Überarbeiteter Motoradapter . . . . .  | 41 |
| 2.20 | Für erste Tests teilweise montierter Aluminium-Prototyp . . . . .                                    | 42 |
| 2.21 | Der neuentwickelte Primärtargetaufbau . . . . .  | 43 |



---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.1  | Funktionsprinzip der optischen Logikplatte . . . . .  | 45 |
| 3.2  | Signalverlauf mit Struktur aus zwei Minima . . . . .  | 46 |
| 3.3  | Prototyp der optischen Logikplatte . . . . .  | 47 |
| 3.4  | Flussdiagramm des Messaufbaus zum faseroptischen Lichtpositions-<br>sensor . . . . .                | 48 |
| 3.5  | Der faseroptischer Lichttaster . . . . .  | 51 |
| 3.6  | Zonen des Tastkopfes . . . . .  | 52 |
| 3.7  | Der BeagleBone Black . . . . .  | 53 |
| 3.8  | Selbstentwickelte Platine zur Kontaktierung der Lichttaster . . . . .                               | 54 |
| 3.9  | Oberflächenaufnahmen der optischen Logikplatte . . . . .  | 55 |
| 3.10 | Vermessung der Geometriedimensionen . . . . .   | 56 |
| 3.11 | Skizzen zum Einbau des Lichttasters . . . . .   | 58 |
| 3.12 | Signalverlauf für zwei verschiedene Abstände des Tastkopfes . . . . .                               | 60 |
| 3.13 | Signalverläufe für verschiedene Tastkopfabstände an Geometrie #2 . . . . .                          | 61 |
| 3.14 | Sprunghafte Veränderung der Geschwindigkeit in einer Messung . . . . .                              | 64 |
| 3.15 | Signalstrukturen in der Langzeitmessung mit verschiedenen Plateaubrei-<br>ten . . . . .             | 66 |
| 3.16 | Datenanalyse eines Segments mit Root . . . . .  | 67 |
| 3.17 | Histogramm der, durch den Lichttaster ermittelten, Positionen . . . . .                             | 68 |
| 3.18 | Verteilung der ermittelten Positionen für beide Bewegungsrichtungen . . . . .                       | 69 |
| 3.19 | An Geometrie # 4 beobachtete Geschwindigkeiten . . . . .  | 70 |
| 3.20 | Mittlere bestimmte Position gegen Fahrgeschwindigkeit an Geometrie<br>#4 . . . . .                  | 70 |
| 3.21 | Vergleich einer Geometrie vor/nach Kompensation der Geschwindigkeit . . . . .                       | 74 |
| 3.22 | Geschwindigkeitsabhängigkeit der Ortsauflösung . . . . .  | 76 |
| 3.23 | Skizze zur Definition der zu berechnenden Zeiten . . . . .  | 78 |
| 3.24 | Ermittelte Halbwertsbreiten an Geometrie #2 vor/nach Kompensation . . . . .                         | 79 |
| 3.25 | Ermittelte Halbwertsbreite gegen Geschwindigkeit des Aufbaus . . . . .                              | 80 |
| 3.26 | Halbwertsbreiten der Geometrien (Variable Plateaus) . . . . .                                       | 82 |
| 3.27 | Anstiegs- bzw. Abfallszeit an linker Kante (Variable Plateaus) . . . . .                            | 83 |
| 3.28 | Anstiegs- bzw. Abfallszeit an rechter Kante (Variable Plateaus) . . . . .                           | 83 |
| 3.29 | Signalverlauf für ein Segment mit verschiedenen Kanten . . . . .                                    | 85 |
| 3.30 | Ermittelte Positionsverteilung für Geometrie #6 . . . . .   | 86 |
| 3.31 | Halbwertsbreiten der Geometrien (Variable Winkel) . . . . .   | 87 |
| 3.32 | Anstiegs- bzw. Abfallszeit bei variablen Winkeln . . . . .  | 88 |
| 3.33 | Skizze zum Strahlengang beim asymmetrischen Tastkopf . . . . .                                      | 90 |
| 3.34 | Asymmetrische Minima in einem Signal . . . . .  | 90 |
| 3.35 | Vergleich der Amplitudendifferenzen der Minima bei verschiedenen<br>Tastkopfausrichtungen . . . . . | 91 |
| A.1  | Signalverläufe bei verschiedenen Geschwindigkeiten $v$ . . . . .                                    | 95 |
| A.2  | Signalverläufe bei verschiedenen Tastkopfabständen $d$ . . . . .                                    | 96 |
| A.3  | Mikroskopaufnahmen der Geometrien, nummeriert nach Tabelle 3.1 . . . . .                            | 97 |
| A.4  | Anpassung der Mittelwerte $\mu$ gegen die Geschwindigkeit . . . . .                                 | 98 |

---

|      |  |     |
|------|--|-----|
| A.5  | Breiten $\sigma$ der Positionsverteilungen gegen die Geschwindigkeit . . . . .   | 99  |
| A.6  | Abfallszeiten an verschiedenen Plateaubreiten gegen die Geschwindigkeit bei verschiedenen Fahrtrichtungen . . . . .    | 100 |
| A.7  | Anstiegszeiten an verschiedenen Plateaubreiten gegen die Geschwindigkeit bei verschiedenen Fahrtrichtungen . . . . .   | 101 |
| A.8  | Halbwertsbreiten an verschiedenen Plateaubreiten gegen die Geschwindigkeit bei verschiedenen Fahrtrichtungen . . . . . | 102 |
| A.9  | Geschwindigkeiten vor dem Motorschaden . . . . .   | 103 |
| A.10 | Geschwindigkeiten nach dem Motorschaden . . . . .  | 104 |
| B.1  | Reflexions- und Absorptionskoeffizienten für Aluminium . . . . .   | 105 |
| B.2  | Reflexions- und Absorptionskoeffizienten für Gold . . . . .  | 106 |
| B.3  | Reflexions- und Absorptionskoeffizienten für Kupfer . . . . .  | 107 |
| C.1  | Layout der selbstentwickelten Platine . . . . .  | 108 |
| C.2  | Schaltplan der selbstentwickelten Platine . . . . .  | 109 |

---

## Danksagungen

Zum Abschluss möchte ich mich herzlich bei all denjenigen bedanken, die mich beim Verfassen dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei Prof. Josef Pochodzalla, der mir das Schreiben dieser Arbeit in seiner Arbeitsgruppe ermöglicht hat und für Fragen oder Anregungen jederzeit zur Verfügung stand.

Bei Dr. Alicia Sanchez Lorente möchte ich mich für die Unterstützung bei theoretischen Fragen bedanken.

Besonders bei Marcell Steinen für seine unermüdliche Geduld bei der Beantwortung von Fragen zu PANDA und ROOT. Ferner für seine hilfreichen Anmerkungen zur Formatierung meiner Arbeit.

Ebenso bei Sebastian Bleser, für die hervorragende Einführung in das Thema: „Primärtarget des Hyperkern-Experiments“ sowie die Unterstützung bei allen Fragen die Mechanik betreffend.

Zudem bei Michael Bölting für die gute Kooperation während der Bearbeitung unserer Arbeiten. Insbesondere möchte ich mich für seinen Zeitaufwand bedanken, die allgemeine Steuerungssoftware des Aufbaus für meine Messungen anzupassen.

Außerdem möchte ich mich bei der feinmechanischen Werkstatt des Instituts für Kernphysik, für die gute Zusammenarbeit bei der Fertigung des Prototypen bedanken, sowie der elektronischen Werkstatt, für ihre Unterstützung bei der Fertigung der Aufsteckplatine des BeagleBones.

Zuletzt bei meiner Familie für die Unterstützung während meines Studiums und beim Schreiben dieser Arbeit.